

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Проектування та експлуатації електронних апаратів
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

ГЮИК.464423.001 ПЗ
(позначення документа)

"Дослідження втрат у волоконно-оптичних
лініях зв'язку (ВОЛЗ)"
(тема)

Виконав здобувач 2 курсу, групи РЕАЗМ-22-1
(шифр групи)

Розгон А.К.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 – Електронні комунікації та радіотехніка

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Радіоелектронні апарати та засоби
(повна назва спеціалізації)

Керівник доц. Меньяйло О.Д.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Допускається до захисту:

Зав. кафедри ПЕЕА Хорошайло Ю.Є.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2023 р.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота складається з: вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел, загальним обсягом 67 стор. Робота містить: 11 таблиць, 28 рисунків та бібліографію з 12 найменувань.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ, ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО, КОЕФІЦІЄНТ ЗАГАСАННЯ, ЗГИНАЛЬНІ ВТРАТИ.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена проблемі вдосконалення існуючих методів розрахунку втрат у вигнутих ділянках оптичних волокон волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ). На підставі аналізу існуючих мереж зв'язку розглянуто загальні питання щодо математичного моделювання оптичних волокон ВОЛЗ.

Виконано теоретичний розрахунок залежностей коефіцієнта загасання вигнутих волокон від радіусу вигину та довжини хвилі. Запропоновано методику розрахунку коефіцієнта згасання вигнутої ділянки стандартного волокна та виконано практичний розрахунок згинальних втрат.

На основі запропонованої методики проведено дослідження згинальних втрат в одномодових стандартних оптичних волокнах ВОЛЗ та експериментальне обґрунтування результатів роботи.

Кваліфікаційна робота виконана за ДСТУ 3008: 2015 [1].

THE SUMMARY

The qualification work consists of: introduction, five parts, conclusions and a list of used literature, the total volume 67 p. Work contains: 11 tables, 28 drawings and bibliography from 12 literature names.

FIBER OPTIC COMMUNICATION LINES, OPTICAL FIBER, COEFFICIENT OF ATTENUATION, BENDING LOSSES.

The qualification work of the magister is dedicated to the problem of improving existing methods of calculating losses in the curved sections of optical fibers of fiber-optic communication lines. Based on the analysis of existing communication networks, general questions regarding the mathematical modeling of optical fibers of fiber-optic communication lines are considered.

A theoretical calculation of the dependences of the attenuation coefficient of bent fibers on the bending radius and wavelength was performed. A methodology for calculating the attenuation coefficient of a curved section of a standard fiber is proposed and a practical calculation of bending losses is performed.

On the basis of the proposed methodology, a study of bending losses in single-mode standard optical fibers of the fiber-optic communication lines and experimental substantiation of the work results was carried out.

Qualification work was performed in accordance with DSTU 3008:2015 [1].

ЗМІСТ

Вступ	6
1 Основні параметри оптичних волокон	11
1.1 Параметри оптичного волокна	11
1.2 Класифікація оптичних волокон	13
1.3 Постановка завдання	20
2 Аналіз явищ в оптичних волокнах	22
2.1 Дисперсія в оптичних волокнах	22
2.2 Загасання в оптичних волокнах	28
2.3 Виникнення втрат у вигнутому оптичному волокні	30
3 Розрахунок втрат у вигнутих стандартних оптичних волокнах	39
3.1 Розрахунок поля основної моди волокна	39
3.2 Розрахунок коефіцієнта загасання вигнутої ділянки волокна	42
3.3 Практичний розрахунок згинальних втрат	47
4 Охорона праці	53
4.1 Аналіз умов праці на робочому місці	53
4.2 Виробнича санітарія	56
4.3 Розрахунок вентиляції	57
4.4 Електробезпека	60
4.5 Пожежна безпека	61
Висновки	64
Список використаних джерел	66
Додаток А. Презентація	67

ВСТУП

Прилади телекомунікацій та засоби передачі даних стикаються з динамічно зростаючим попитом на частотні ресурси. Ця тенденція в основному пов'язана зі збільшенням числа користувачів Internet та також зі зростаючою взаємодією міжнародних операторів зв'язку і збільшенням обсягів інформації, що передається. Смуга пропускання для одного користувача стрімко збільшується. Тому оператори зв'язку під час побудови сучасних інформаційних мереж найчастіше використовують волоконно-оптичні кабельні системи. Це стосується, як побудови протяжних телекомунікаційних магістралей, так і локальних обчислювальних мереж. Оптичне волокно на даний час вважається найдосконалішим фізичним середовищем для передачі інформації, а також найперспективнішим середовищем для передачі великих потоків інформації на значні відстані. Сьогодні волоконна оптика знаходить застосування практично у всіх сферах, пов'язаних із передачею інформації.

АКТУАЛЬНІСТЬ. Кваліфікаційна робота присвячена теоретичному дослідженню втрат у вигнутих оптичних волокнах. У роботі розглядаються основні аспекти щодо появи згасання на вигнутій ділянці стандартного оптичного волокна та згинальних втрат загалом за лінією зв'язку.

При прокладанні та монтажі оптичного кабелю особливо всередині приміщень неможливо уникнути вигинів волокна, що спричиняє додаткові втрати. Допустимий радіус вигину нормується для різних типів оптичних волокон. Вигини можуть також спеціально створюватися для введення та виведення випромінювання через бічну поверхню волокна. Такі вигини можуть використовуватися в зварювальних апаратах для вимірювання втрат, що вносяться в з'єднаннях волокон (система LID), та при організації службового зв'язку. Спеціально створений вигин може використовуватися для несанкціонованого доступу до інформації, що передається по волокну.

Тому дуже важливо вміти проводити розрахунки коефіцієнта згасання вигнутої ділянки стандартного волокна та згинальних втрат загалом.

ОБ'ЄКТОМ ДОСЛІДЖЕННЯ в роботі є оптичні волокна волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ). ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ – згасання на вигнутій ділянці стандартного оптичного волокна та згинальні втрати.

МЕТОЮ РОБОТИ є аналіз параметрів оптичних волокон та розробка методики практичного розрахунку залежностей коефіцієнта загасання на вигнутій ділянці волокна від радіусу вигину та довжини хвилі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити ряд завдань:

1) обґрунтувати вибір наукового напрямку та методів дослідження, сформулювати постановку завдання на основі існуючих теоретичних і експериментальних підходів моделювання оптичних волокон;

2) провести аналіз конструкції та параметрів різних типів оптичних волокон та виявити причини появи їх вигинів у сучасних ВОЛЗ;

3) запропонувати методику розрахунку залежностей коефіцієнта загасання світла у вигнутій ділянці волокна від радіусу його вигину та довжини хвилі світла;

4) провести дослідження згинальних втрат в одномодових стандартних оптичних волокнах та в волокнах з ненульовою зміщеною дисперсією в розсіяному світлі.

ЗВ'ЯЗОК РОБОТИ З НАУКОВИМИ ПРОГРАМАМИ, ПЛАНАМИ, ТЕМАМИ. Дана кваліфікаційна робота виконувалась в рамках наукових інтересів кафедри Проектування та експлуатації електронних апаратів (ПЕЕА) Харківського національного університету радіоелектроніки (ХНУРЕ) за напрямками: «Діагностика електронних пристроїв вбудованих систем» (наук. керівник – доц. Меньяло О.Д.), «Апаратно-програмні засоби проектування РЕА» (наук. керівник – доц. Подгайко О.І.).

НАУКОВА НОВИЗНА РЕЗУЛЬТАТІВ. В результаті виконаної кваліфікаційної роботи розроблено досить просту методику розрахунку

залежностей коефіцієнта загасання світла у вигнутій ділянці волокна від радіусу його вигину та довжини хвилі світла.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

1) результати роботи надають відомості щодо згинальних втрат в одномодових стандартних оптичних волокнах;

2) обґрунтована можливість розрахунку залежності коефіцієнта загасання світла у вигнутій ділянці волокна в залежності від типу оптичного волокна та особливості прокладення оптичного кабелю ВОЛЗ.

ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ РОБОТИ полягає в тому, що показана залежність оптичних втрат від конструкції оптичного волокна та особливості прокладення оптичного кабелю.

Запропоновано досить просту методику розрахунку згинальних втрат в одномодовому стандартному оптичному волокні.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ базуються на загальній теорії фізичної оптики та математичних чисельних методах розрахунку.

Для оцінювання адекватності теоретичних побудов використовується натурний експеримент з наступною обробкою отриманих результатів статистичними методами.

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ. Основні результати кваліфікаційної роботи висвітлені на самостійних доповідях за дисциплінами: «Основи наукових досліджень в телекомунікаціях та радіотехніці» і «Аналіз та синтез радіоелектронних апаратів», обговорювалися на наукових кружках кафедри ПЕЕА та студентських конференціях у 2022–2023 рр.

За результатами досліджень підготовлена в співавторстві до друку наукова стаття, але, за складної сучасної ситуації, не видана.

СТРУКТУРА І ОБСЯГ РОБОТИ. Кваліфікаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновку та списку використаних джерел.

Матеріал викладено на 67 сторінках та містить: 28 рисунків, 11 таблиць, бібліографію з 12 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

У ВСТУПІ показана актуальність наукового напрямку; сформульовані мета та завдання дослідження; наведені основні наукові результати та практична цінність роботи; показано зв'язок роботи з науковими програмами, її апробація, а також, представлений реферативний огляд розділів магістерської кваліфікаційної роботи.

У ПЕРШОМУ РОЗДІЛІ проведено аналіз сучасної номенклатури оптичних кабелів для ВОЛЗ та розглянуті основні параметри використовуваних оптичних волокон.

Облік впливу типу та особливостей прокладення оптичного кабелю на різних ділянках мережі ВОЛЗ викликають значні труднощі. Вирішення зазначених проблем ставиться основною метою кваліфікаційної роботи.

У ДРУГОМУ РОЗДІЛІ проведено аналіз таких явищ, як: дисперсія і загасання світла в оптичних волокнах та виникнення додаткових втрат у вигнутому оптичному волокні.

Розглянуті підходи до математичного моделювання та кількісного оцінювання різних втрат в оптичних волокнах.

У ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛІ на основі аналізу змісту необхідних завдань запропонована методика розрахунку втрат у вигнутих стандартних оптичних волокнах, яка складається з розрахунку поля основної моди волокна та розрахунку коефіцієнта загасання світла на вигнутій ділянці волокна.

Проведено практичний розрахунок згинальних втрат за запропонованою методикою для одномодового режиму передачі даних в трьох типах сучасних оптичних волокон, що використовуються в ВОЛЗ, за темою магістерської кваліфікаційної роботи.

Проведені експериментальні дослідження основних параметрів втрат: залежності коефіцієнта згасання світла від радіусу вигину оптичного волокна

на різних довжинах хвиль та залежності коефіцієнта згасання світла від довжини його хвилі за різних радіусів вигину оптичного волокна.

Виконано порівняльний аналіз отриманих результатів та надані рекомендації щодо використання загальних результатів роботи.

У ЧЕТВЕРТОМУ РОЗДІЛІ проведено аналіз умов праці на робочому місці проектувальника, розглянуті основні небезпечні фактори в обчислювальному центрі та надані рекомендації щодо виробничої безпеки і санітарії праці.

У розділі докладно розглянуті вимоги до приміщення, у якому виконуються роботи на ПК, та питання безпеки при безпосередньому виконанні робіт з моделювання. Проведено розрахунок кондиціювання та опрацьовані питання електробезпеки і пожежної безпеки в приміщенні.

У ЗАГАЛЬНИХ ВИСНОВКАХ наведені основні результати та висновки, отримані за кваліфікаційною роботою.

Магістерська кваліфікаційна робота виконана в інтересах кафедри ПЕЕА ХНУРЕ.

1 ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН

1.1 Параметри оптичного волокна

Оптичне волокно (ОВ) являє собою циліндричну багатошарову кварцову нитку, що складається з серцевини, оболонки та одного або кількох захисних покриттів (рис. 1.1а). Серцевина та оболонка виготовляються із плавленого кварцу SiO_2 . Зазвичай оболонка ОВ виготовляється з чистого кварцу, має постійний показник заломлення n_2 та покрита захисним шаром акрилатного лаку, а серцевина для забезпечення необхідного профілю показника заломлення n_1 легується домішками (GeO_2 , P_2O_5), які збільшують показник залому. Розміри серцевини та оболонки ОВ стандартизовані. Позначаються розміри ОВ так: діаметр серцевини/діаметр оболонки.

За оптичним волокном здійснюється передача оптичних сигналів. Для того, щоб утримати світло в оптоволокну, показник заломлення в його центрі має бути вищим, ніж по краях. Показник заломлення оболонки ОВ – постійна величина, тоді як показник заломлення серцевини може бути як постійним, так і змінюватись за певним законом, що називається профілем показника заломлення. Це закон зміни показника заломлення у поперечному перерізі оптичного волокна.

Усі ОВ можна розділити на оптичні волокна (рис. 1.1б):

- зі ступінчастим профілем показника заломлення;
- з градієнтним профілем показника заломлення.

На межі серцевини та оболонки може спостерігатися явище повного внутрішнього відбиття. Якщо промінь із оптично більш щільного середовища переходить у менш щільне (тобто $n_1 > n_2$, $\varphi_i > \varphi_i$), при деякому куті падіння $\varphi_i = \varphi_{кр}$ кут заломлення дорівнюватиме $\varphi_t = \pi/2$ (промінь e на рис. 1.2а). При

подальшому збільшенні кута падіння $\varphi_i > \varphi_{кр}$ заломлений промінь зникне (промені f та g на рис. 1.2а).

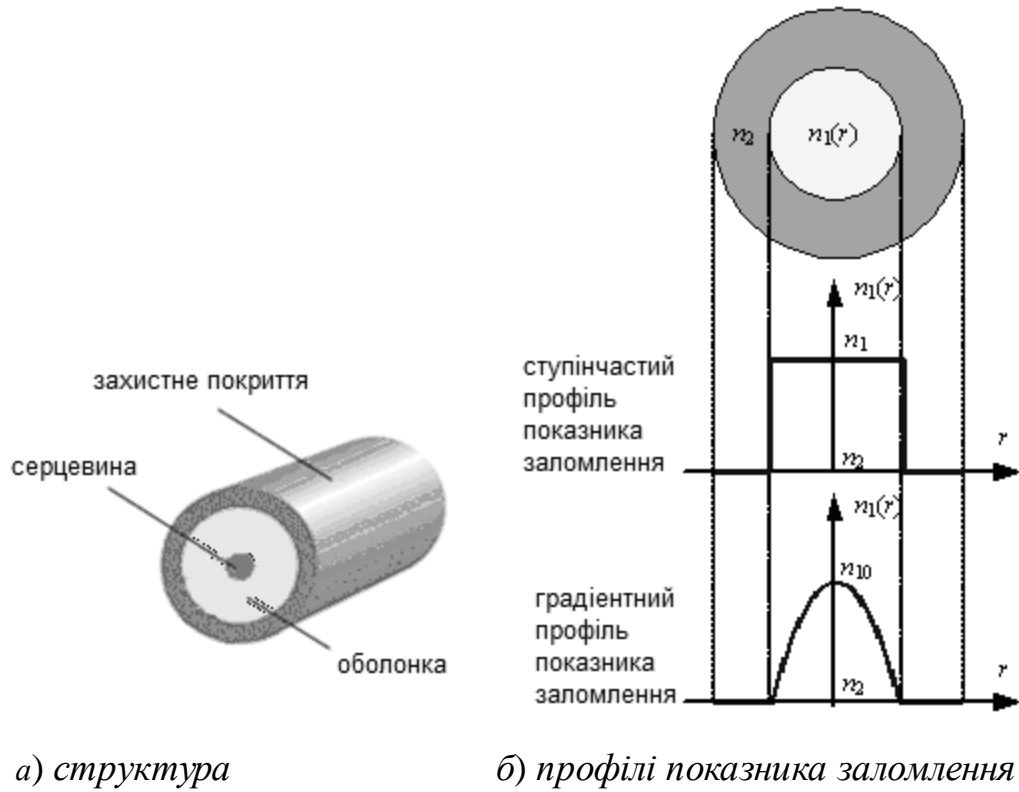


Рис. 1.1 – Параметри оптичного волокна

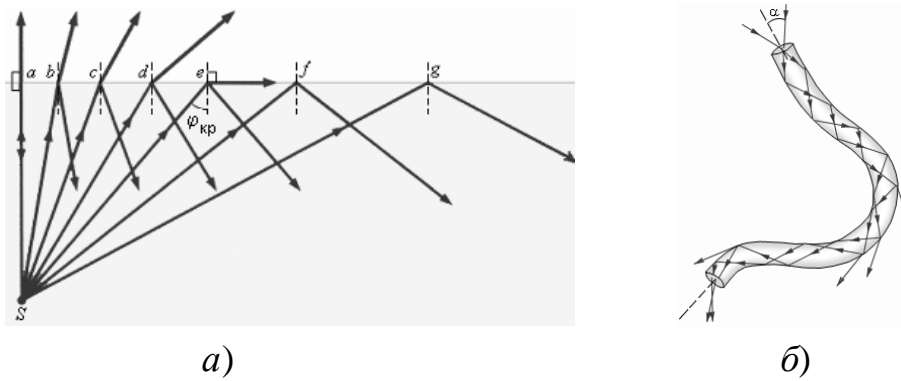


Рис. 1.2 – Повне внутрішнє відбиття

З закону Снелліуса ($n_1 \sin \varphi_i = n_2 \sin \varphi_t$) можна отримати:

$$\varphi_{кр} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

Коефіцієнт відбиття при $\varphi_i \geq \varphi_{кр}$ дорівнює $R = 1$. Це означає, що відбивається

100% енергії, тобто втрат на відбиття немає. На цьому фізичному явищі засновано роботу оптичних волокон з точки зору геометричної оптики [2] (рис. 1.2б).

Оптичний сигнал поширюється у серцевині волокна та на межі з оболонкою відчуває повне внутрішнє відбиття. Він проникає в оболонку на глибину набагато меншу за її товщину i , отже, не взаємодіє з покриттям з акрилатного лаку. Це покриття необхідне для захисту кварцової оболонки від механічних пошкоджень та впливу води.

1.2 Класифікація оптичних волокон

Основне застосування оптичних волокон знаходять як середовище передачі на волоконно-оптичних телекомунікаційних мережах різних рівнів: від міжконтинентальних магістралей до домашніх комп'ютерних мереж.

Застосування оптичних волокон для ліній зв'язку зумовлено тим, що оптичне волокно забезпечує високу захищеність від несанкціонованого доступу, низьке згасання сигналу при передачі інформації на великі відстані та можливість оперувати з надзвичайно високими швидкостями передачі.

Усі оптичні волокна діляться за кількістю мод поширення на [3]:

- багатомодові;
- одномодові.

Для всіх типів волокон, які застосовуються в лініях зв'язку, загальний діаметр волокна з покриттям – 250 мкм, а діаметр кварцової оболонки має стандартний розмір 125 мкм (рис. 1.1а). Діаметр серцевини у одномодових волокон може змінюватись залежно від типу волокна в межах 7–9 мкм. Номінальний діаметр серцевини багатомодових волокон 50 або 62,5 мкм. Одномодові волокна застосовуються у транспортних мережах усіх трьох рівнів: на магістральному рівні, на рівні розподілу та на рівні доступу. Багатомодові волокна застосовуються в локальних обчислювальних мережах

і частково в транспортних мережах на рівні доступу. Існує два стандарти таких волокон, що відрізняються діаметром серцевини.

У волоконно-оптичних лініях зв'язку (ВОЛЗ) найчастіше використовуються такі стандарти волокон:

- багатомодове градієнтне волокно 50/125 (рис. 1.4б);
- багатомодове градієнтне волокно 62.5/125 (рис. 1.4б);
- одномодове ступінчасте волокно 8-10/125 (рис. 1.4в);
- одномодове волокно із зміщеною дисперсією 8-10/125 (рис. 1.3г);
- одномодове волокно з ненульовою зміщеною дисперсією (за профілем показника заломлення це волокно схоже з попереднім типом).

Рекомендовані параметри багатомодових ВОЛЗ наведено у табл. 1.1 [4].

Таблиця 1.1 – Рекомендовані параметри

Параметри	Градієнтне багатомодове ОВ	
	50/125	62,5/125
Номінальне згасання на довжині хвилі 850/1300 нм, дБ/км	$\leq 2.4 / \leq 0.5$	$\leq 2.8 / \leq 0.6$
Максимальне згасання на довжині хвилі 850/1300 нм, дБ/км	$\leq 2.5 / \leq 0.8$	$\leq 3.0 / \leq 0.7$
Смуга пропускання на довжині хвилі 850/1300 нм, МГц км	$\geq 400 / \geq 800$	$\geq 200 / \geq 400$
Довжина хвилі нульової дисперсії λ_0 , нм	1297-1316	1332-1354
Нахил нульової дисперсії S_0 , пс/(нм ² •км)	≤ 0.101	≤ 0.097
Діаметр серцевини d , мкм	50.0 ± 3.0	62.5 ± 3.0
Числова апертура NA	0.200 ± 0.015	0.275 ± 0.015
Стандартна довжина волокна, що постачається на катушці, м	1100-4400	1100-8800
Діаметр оболонки, мкм	125.0 ± 2.0	125.0 ± 2.0
Радіальне відхилення серцевини щодо оболонки, мкм	≤ 3.0	≤ 3.0
Діаметр захисного покриття, мкм	245 ± 10	245 ± 10
Відхилення серцевини від кола	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$
Тестове зусилля на розрив, ГН/м ²	≥ 0.7	≥ 0.7
Ефективний показник заломлення n_{eff} на довжині хвилі 850/1300 нм	1.4897/1.4856	1.5014/1.4966

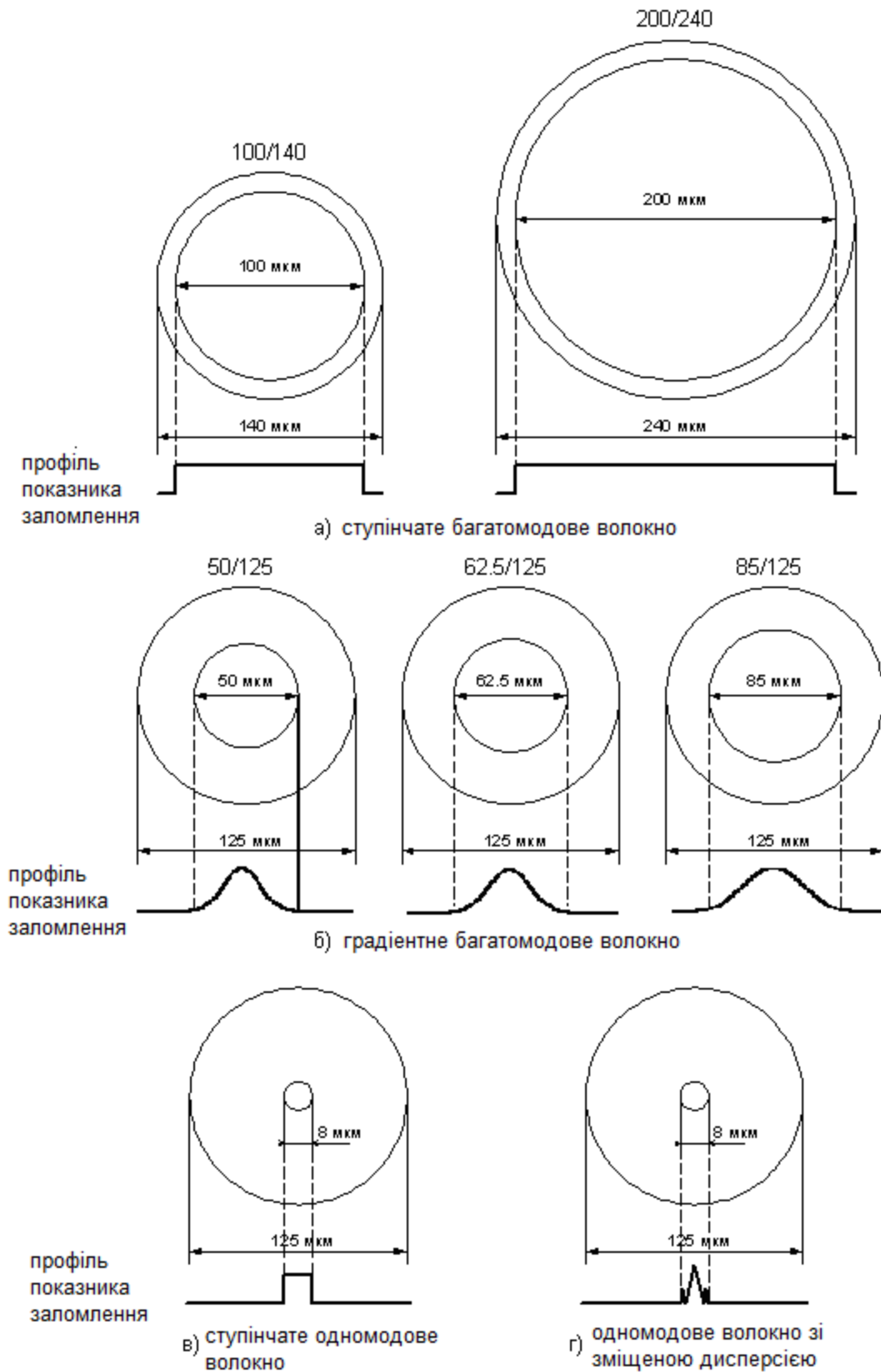


Рис. 1.3 – Стандарти оптичних волокон

Одномодове волокно зі ступінчастим профілем показника заломлення (рис. 1.4) називають стандартним Standard Fiber (SF). Це волокно оптимізовано для другого вікна прозорості (1260–1360 нм). Його довжина хвилі нульової дисперсії становить $\lambda_{0D} \sim 1.35$ мкм.

Стандартні ОВ мають дисперсію на $\lambda = 1310$ нм менше 3.5 пс/(нм•км), а на $\lambda = 1550$ нм їх дисперсія зростає до 18 пс/(нм•км), хоча згасання при цьому зменшується до 0.2 дБ/км та вони можуть успішно використовуватися на цій довжині хвилі. У цьому довжина ділянки регенерації зазвичай обмежується дисперсією.

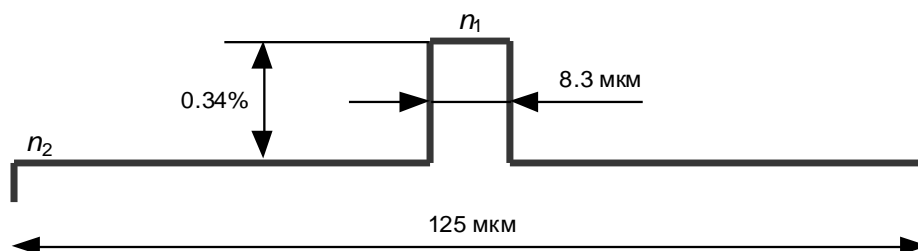


Рис. 1.4 – Профіль показників заломлення стандартного одномодового ОВ

З метою оптимізації дисперсійних параметрів волокон на довжині хвилі 1,55 мкм, на якій кварцові волокна мають мінімальне згасання, були розроблені градієнтні одномодові ОВ.

Ускладнюючи профіль показника заломлення (рис. 1.5) та роблячи його форму близькою до трикутної, отримали волокна, що мають довжину хвилі нульової дисперсії поблизу 1550 нм. Такі ОВ отримали назву оптичні волокна зі зміщеною дисперсією (Dispersion Shifted Fiber – DSF).

Ці ОВ мають дисперсію на $\lambda = 1550$ нм менше 3,5 пс/(нм•км), але в $\lambda = 1310$ нм до 18 пс/(нм•км).

Ще один вид одномодових ОВ – волокна з ненульовою зміщеною дисперсією (Non Zero Dispersion Shifted Fiber – NZDSF). Ці ОВ були розроблені спеціально для систем спектрального ущільнення (DWDM).

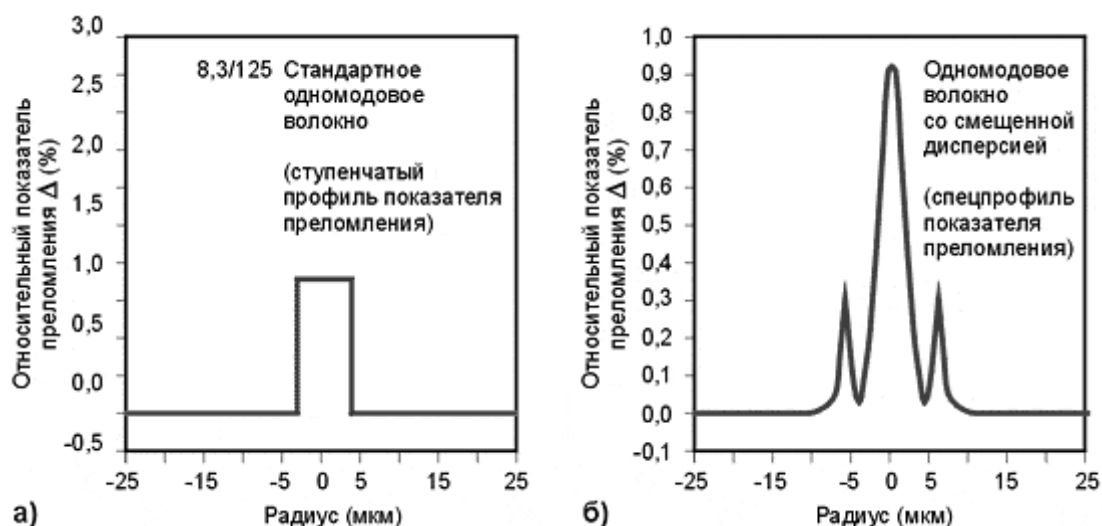


Рис. 1.5 – Профілі показників заломлення ОВ зі зміщеною дисперсією

Волокна NZDSF оптимізовані таким чином, що довжина хвилі нульової дисперсії у них винесена за межі смуги пропускання оптичного ербієвого підсилювача (такі підсилювачі можуть використовуватися тільки на початку або в кінці лінії, вихідна потужність яких становить 10–500мВт (10–27дБм)).

Типи одномодових волокон відрізняються один від одного лише формою профілю показника заломлення (рис. 1.6) та відповідно дисперсійними характеристиками.

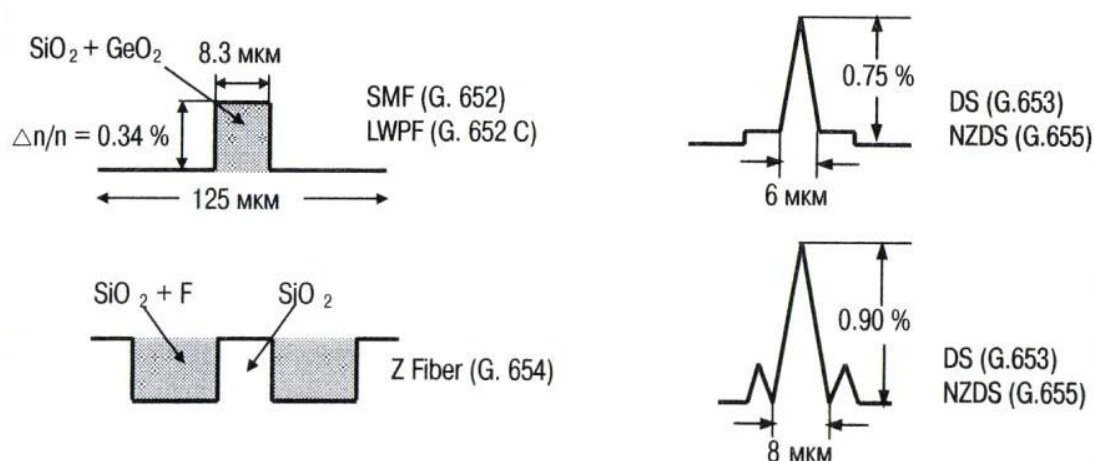


Рис.1.6 – Профілі показника заломлення в одномодових волокнах

Основні типи одномодових волокон, застосовуваних у ВОЛЗ, нормуються міжнародними стандартами *ITU-T Rec. G.652-G.655*:

- G.652 – волокна з незміщеною дисперсією (SM волокна) з довжиною хвилі нульової дисперсії та довжиною хвилі відсічення біля 1310 нм;

- G.653 – волокна зі зміщеною дисперсією (DS волокна) з довжиною хвилі нульової дисперсії в районі 1550 нм та довжиною хвилі відсічення біля 1310 нм.

- G.654 – волокна з незміщеною дисперсією (SM волокна) з довжиною хвилі нульової дисперсії біля 1310 нм та довжиною хвилі відсічення – 1550 нм.

- G.655 – волокна зі зміщеною ненульовою дисперсією (NZDS волокна), що мають малу дисперсію (0,1–6 пс/нм км) у діапазоні довжин хвиль 1530–1565 нм.

- G.656 – волокна з ненульовою дисперсією для систем грубого ущільнення по довжинах хвиль (CWDM – Coarse Wavelength Division Multiplexing – велика відстань між спектральними каналами – 20 нм).

У табл. 1.2 наведено рекомендації МСЕ щодо параметрів волокон різних типів.

Таблиця 1.2 – Рекомендовані МСЕ параметри волокон

Параметри ОВ		G.652	G.653	G.654	G.655
Тип волокна		SSF	DSF	CSF	+NZDSF
Вікна прозорості, нм		1350-1550	1500-1600	1550	1530-1565
Коефіцієнт згасання, дБ/км	1310	< 1.0	< 1.0	не норм.	не норм.
	1383	< 2.0	< 2.0	не норм.	не норм.
	1550	< 0.22	< 0.22	< 0.22	< 0.22
Діаметр поля моди, мкм	1310	9.3 - 9.8	не норм.	не норм.	не норм.
	1383	9.3 - 9.8	не норм.	не норм.	не норм.
	1550	9.0 - 10.0	7.0 - 8.6	9.5 - 10.5	9.0 - 10.0
Максимальна кабельна довжина хвилі відсічення, нм		1260	1270	1530	1480
Довжина хвилі нульової дисперсії, нм		1310 ± 10	1550 ± 25	1280 ± 20	не норм.
Нахил нульової дисперсії, пс/(нм ² •км)		0.093	0.085	0.095	< 0.169

У табл. 1.2 є параметр – кабельна довжина хвилі відсічення. Це довжина хвилі відсікання волокна, покладеного в кабель. Для волокна в кабелі довжина хвилі відсікання менше, ніж для «прямого» волокна, тобто одномодовий режим передачі настає раніше.

Існує також кілька спеціальних типів одномодових волокон, що застосовуються у волоконно-оптичних пристроях:

- ОВ для компенсації дисперсії (DC – Dispersion Compensating), які застосовуються у модулях компенсації дисперсії.

- ОВ з домішкою рідкісноземельних елементів, що застосовуються в оптичних підсилювачах, наприклад, EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier.

- ОВ, що зберігають стан поляризації випромінювання (PM – Polarization Maintaining), що застосовуються у гіроскопах, поляризаційних дільниках та змішувачах.

- дірчасті ОВ (Holey Fiber), що застосовуються в компенсаторах дисперсії, оптичних шнурах, нелінійних елементах.

На рис. 1.8 наведено структуру та профіль показника заломлення дірчастого волокна [5].



Рис. 1.8 – Параметри дірчастого волокна

Крім розглянутих вище волокон, існують також одномодові ОВ зі згладженою дисперсією Cutoff Shifted Fiber (CSF). У цих волокнах використовується чотиришарова оболонка, що дозволяє досягти майже

плоскої і близької до нульової дисперсійної характеристики ($|D_x| = 1-6$ пс/(нм² км)) в діапазоні довжин хвиль від 1300 до 1650 нм. При цьому вони мають знижений коефіцієнт загасання завдяки суто кварцовій серцевині та збільшеному діаметру модового поля.

Волокна із згладженою дисперсією використовуються лише на довжині хвилі 1550 нм для зв'язку на великі відстані без проміжних лінійних підсилювачів та регенераторів, переважно у підводних магістралях. Великий діаметр модового поля дозволяє використовувати більше посилення потужності без збільшення нелінійних спотворень сигналу.

1.3 Постановка завдання

При побудові сучасних інформаційних мереж найчастіше використовують волоконно-оптичні кабельні системи (або ВОЛЗ). Це стосується, як побудови протяжних телекомунікаційних магістралей, так і локальних обчислювальних мереж. Оптичне волокно на даний час вважається найдосконалішим фізичним середовищем для передачі інформації, а також найперспективнішим середовищем для передачі великих потоків інформації на значні відстані.

При прокладанні та монтажі оптичного кабелю особливо всередині приміщень неможливо уникнути вигинів волокна, що звичайно спричиняє додаткові втрати. Ці втрати обумовлені оптичними явищами, які відбуваються в оптичному волокні – середовищі розповсюдження світла, що є носієм інформації.

Становить практичний та науковий інтерес вивчення механізму появи таких втрат та застосування математичних моделей оптичного волокна з позиції універсальності їх використання для розрахунків та дослідження основних параметрів ВОЛЗ і якості передачі інформації в мережі [6].

Таким чином доцільні дослідження згинальних втрат в волокнах з ненульовою зміщеною дисперсією в розсіяному світлі та розробка досить простої методики розрахунку цих втрат в одномодовому стандартному оптичному волокні.

Необхідно провести аналіз явищ в оптичних волокнах, визначити механізми виникнення в них втрат та вибрати найбільш вдалі розрахункові моделі опису. Запропонувати за обраними моделями методику розрахунку згинальних втрат на оптичній ділянці.

Також, необхідно провести експериментальні дослідження щодо адекватності теоретичних побудов. Отримані теоретичні висновки в роботі слід порівняти з експериментальними даними та надати висновок щодо придатності та обмежень використання запропонованих моделей в практичних завданнях.

2 АНАЛІЗ ЯВИЩ В ОПТИЧНИХ ВОЛОКНАХ

2.1 Дисперсія в оптичних волокнах

Інформація по ОВ передається у вигляді коротких оптичних імпульсів. Енергія імпульсу розподіляється між усіма спрямованими модами. Швидкості всіх мод вздовж їх траєкторії в ступінчастому ОВ однакові. Однак час, який їм знадобиться для проходження 1 км кабелю, буде різним. На виході ОВ імпульси окремих мод, що прийшли у різний час, складаються, утворюючи ширший у порівнянні з вхідним оптичний імпульс (рис. 2.1).

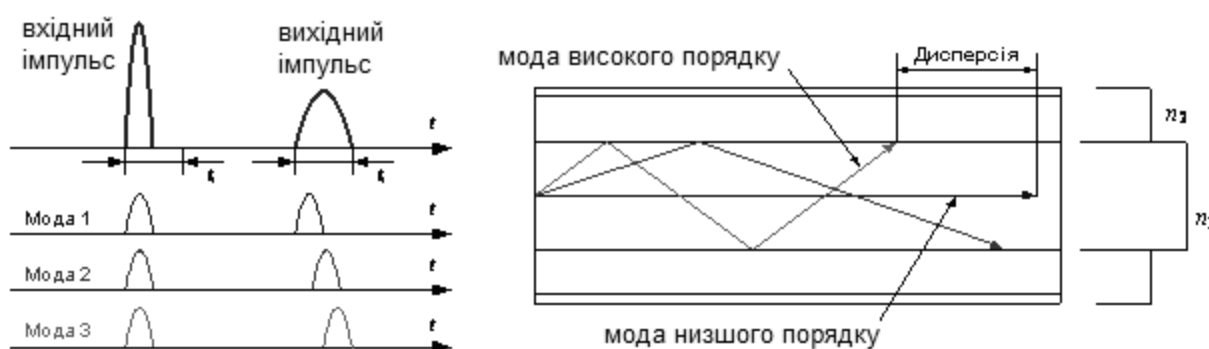


Рис. 2.1 – Траєкторії меридіональних променів у ОВ зі ступінчастим профілем показника заломлення

Явище розширення імпульсу в багатомодовому ОВ називається міжмодовою дисперсією, що характеризується величиною D_m , що вимірюється нс/км. Якщо величина дисперсії відома, то розширення імпульсу Δt у волокні довжиною L у першому наближенні визначиться виразом [7]:

$$\Delta t = \sqrt{t_{\text{вих}}^2 - t_{\text{вх}}^2} = D_m \cdot L \quad (2.1)$$

Проведемо оцінку найбільшого значення міжмодової дисперсії. Найменшу траєкторію та найменший час поширення t_{\min} має промінь, що розповсюджується вздовж осі ОВ:

$$t_{\min} = \frac{L \cdot n_1}{c} \quad (2.2)$$

Найбільшу траєкторію та найбільший час розповсюдження t_{\max} має промінь, що поширюється за ОВ, відбиваючись від межі розділу серцевини та оболонки під кутом повного внутрішнього відбиття:

$$t_{\max} = \frac{L \cdot n_1}{c \cdot \sin(\varphi_{кр})} = \frac{L \cdot n_1^2}{c \cdot n_2} \quad (2.3)$$

Тоді маємо:

$$D_m = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{L} = \frac{n_1}{c} \left[\frac{n_1}{n_2} - 1 \right] = \frac{n_1 \cdot \Delta n}{c \cdot n_2} \quad (2.4)$$

Дисперсія буде обмежувати швидкість передачі інформації за ВОЛЗ.

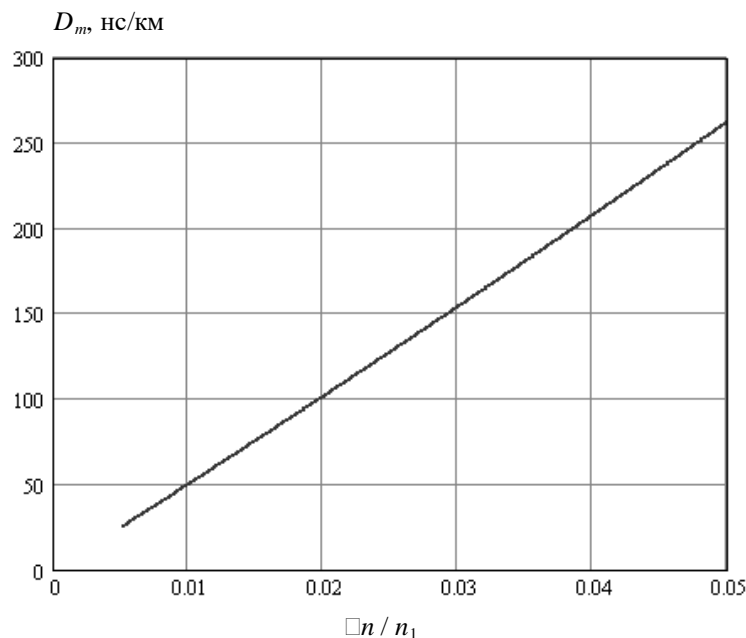


Рис. 2.2 – Залежність міжмодової дисперсії від відносної різниці показників заломлення серцевини та оболонки

З величиною міжмодової дисперсії D_m [нс/км] пов'язане поняття широкосмуговості волокна або питомої смуги пропускання B [МГц км]:

$$B = 440/D_m. \quad (2.5)$$

Величина широкосмуговості для ступінчастих багатомодових кварцових волокон обмежується величиною 20–50 МГц•км. Для градієнтних багатомодових волокон широкосмуговість лежить у межах 200–2000 МГц км.

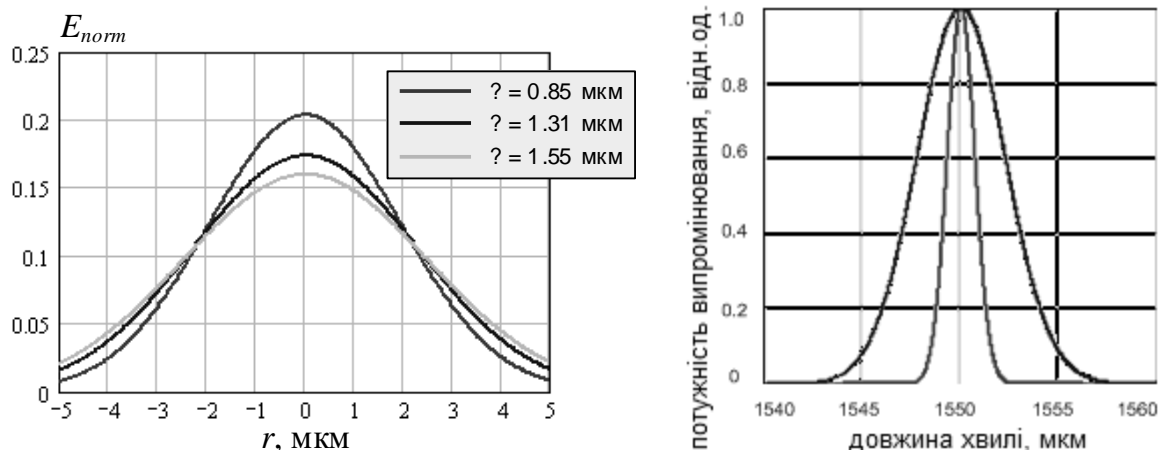
Радикальним способом зменшення дисперсії є перехід від багатомодової передачі до одномодової. Вперше одномодовий режим передачі у волокні зі ступінчастим профілем показника заломлення було досягнуто шляхом зменшення радіусу серцевини до 5 мкм. Такі волокна називають стандартними одномодовими волокнами.

Важливим параметром, що нормується, у одномодових волокон є діаметр w або радіус r_{nm} модової плями (поля), який характеризує втрати при введенні світла в волокно та використовується для розрахунків замість радіуса або діаметра серцевини, його величина залежить від типу волокна і робочої довжини хвилі та лежить в межах 8–10 мкм (фактично він на 10–12% більше діаметра серцевини).

Для одномодового ОВ розподіл інтенсивності поля моди можна апроксимувати гаусівською кривою:

$$F(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_{nm}^2}\right). \quad (2.6)$$

На рис. 2.3а показані розраховані за виразами розподілу модового поля стандартного волокна на довжинах хвиль, які зазвичай використовуються для зв'язку у ВОЛЗ.



а) розподіл модового поля основної моди б) спектр випромінювання джерела

Рис. 2.3 – Розподіли у стандартному волокні

Оскільки швидкість поширення хвилі світла в ОВ залежить від довжини хвилі випромінювання λ , різні спектральні складові сигналу поширюються з різною швидкістю (рис. 2.3б).

Як відомо, хроматична дисперсія складається з двох складових: матеріальної та хвиле водної [7] –

$$D_x = D_{mt} + D_e \quad (2.7)$$

Як фізична величина, вона вимірюється в пс/(нм•км) та означає розширення імпульсу в волокні довжиною 1 км при ширині спектра сигналу 1 нм (з урахуванням швидкості передачі та ширини спектра джерела випромінювання).

Матеріальна дисперсія обумовлена залежністю показника заломлення кварцу n (як фазового, так й групового) або швидкості поширення світла в кварці $V(\lambda) = c/n$ від довжини хвилі (рис. 2.4) та пропорційна другий похідний показника заломлення за довжиною хвилі:

$$D_{mt} = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad (2.8)$$

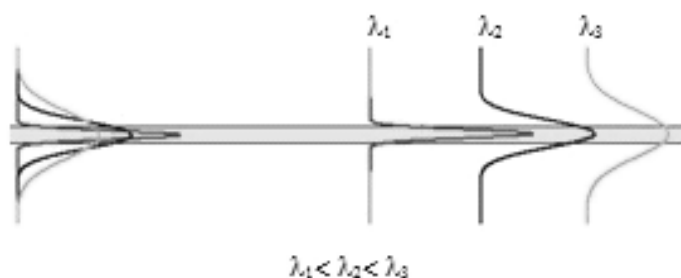


Рис. 2.4 – Виникнення матеріальної дисперсії

На рис. 2.5 показано залежність матеріальної дисперсії від довжини хвилі. Видно, що матеріальна дисперсія має знак та за довжини хвилі нульової матеріальної дисперсії $\lambda = \lambda_{0mat}$ проходить через 0.

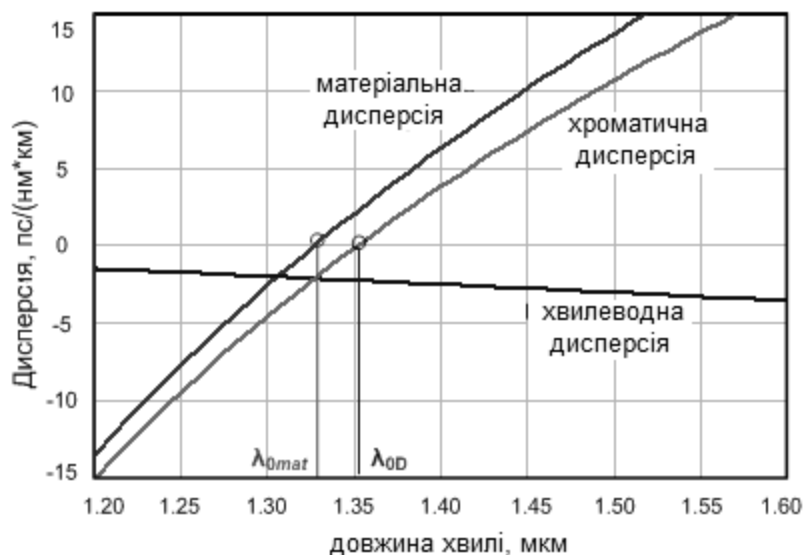


Рис. 2.5 – Хроматична дисперсія в одномодовому волокні

Хвильоводна дисперсія D_w не пов'язана з властивостями матеріалу, але залежить від конструкції та розмірів хвильоводу. Її поява пов'язана з тим, що хвиля в одномодовому ОВ поширюється частково в серцевині, частково в оболонці та показник заломлення для неї набуває середнього значення між показниками заломлення серцевини і оболонки. При зміні довжини хвилі глибина проникнення поля в кварцову оболонку змінюється, отже, змінюється середнє значення показника заломлення (рис. 2.6).

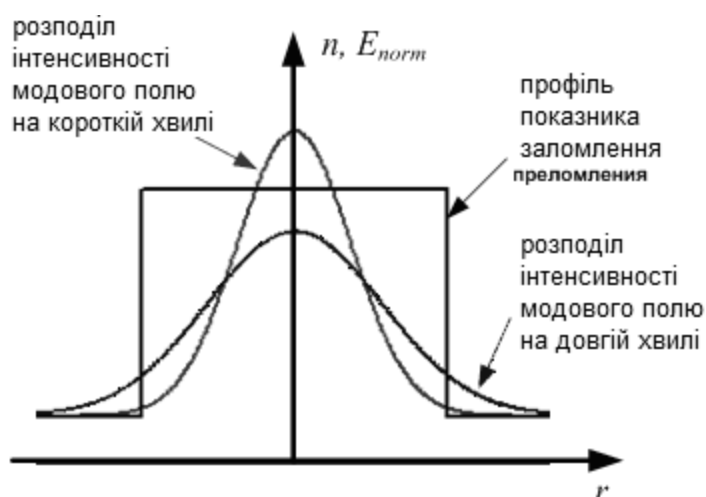


Рис. 2.6 – Визначення профілю хвильоводної дисперсії

Хвильоводна дисперсія негативна і зі збільшенням λ вона зменшується. Це дозволяє, змінюючи розміри і конструкцію ОВ, керувати залежністю D_g , отже, й залежністю D_{xp} від λ .

Існує така довжина хвилі, за якої матеріальна та хвильоводна дисперсії рівні за модулем та мають протилежні знаки, тобто хроматична дисперсія дорівнює нулю. Цю довжину хвилі називають довжиною хвилі нульової хроматичної дисперсії або просто довжиною хвилі нульової дисперсії λ_{0D} .

У більшості одномодових ОВ розташування осей найбільшої і найменшої швидкості є випадковим, а розширення імпульсу, що проходить за ОВ, зростає зі збільшенням довжини L пропорційно квадратному кореню з довжини ОВ –

$$\Delta t = D_p \cdot \sqrt{L}, \quad (2.9)$$

де D_p – поляризаційно-модова дисперсія.

Для більшості одномодових ОВ величина поляризаційно-модової дисперсії лежить у межах $0.02\text{--}0.2$ пс/км^{1/2}.

2.2 Загасання в оптичних волокнах

За поширення світла в оптичному середовищі, він, як відомо, слабшає, що зветься загасанням a , яке вимірюється в децибелах або неперах. Для оптичних вимірів [8]:

$$a(\text{дБ}) = 10 \cdot \lg \frac{P_0}{P_1} \quad \text{або} \quad a(\text{Нп}) = \ln \frac{P_0}{P_1}, \quad (2.10)$$

де: P_0, P_1 – потужності сигналу на вході та виході ОВ, оптичного кабелю або будь-якого компонента волоконного тракту.

Загальне або загасання, що вноситься, ОВ можна розділити на власне згасання та додаткові втрати.

Власне згасання обумовлено конструкцією самого ОВ. Для однорідного ОВ можна розрахувати коефіцієнт загасання α – величину загасання на одиницю довжини, [дБ/км]:

$$\alpha = \frac{a(\text{дБ})}{L}, \quad (2.11)$$

де L – довжина ОВ, км.

Власні втрати в ОВ переважно зумовлені двома причинами:

- поглинанням;
- розсіюванням.

Розсіювання є фундаментальною (технологічно невід'ємною) причиною загасання в ОВ та зветься релеївське розсіювання. Його особливістю є значна залежність коефіцієнта розсіювання α_s від довжини хвилі λ випромінювання:

$$\alpha_s = \chi_s \lambda^{-4} \quad (2.12)$$

де χ_s – коефіцієнт пропорційності (0.7–0.9 дБ·мкм⁴/км), який залежить від матеріалу (виду та концентрації легуючих добавок тощо) та технології виготовлення ОВ.

Поглинання обумовлено втратами в основному матеріалі ОВ – кварці та домішках. Носить резонансний характер і дає для кварцу піки згасання в

ультрафіолетовій та інфрачервоній областях спектру. У діапазоні довжин хвиль, що використовується, 0,8–1,6 мкм сплески поглинання у кварцу відсутні. Найбільший внесок у поглинання роблять гідроксильні групи OH_2 . Вони дають потужний пік поглинання на довжині хвилі 1383 мкм.

До додаткових втрат відносяться:

- втрати на введенні та виведенні випромінювання;
- втрати, пов'язані з порушеннями геометричної форми волокна та випадково розташованими структурними дефектами;
- згинальні втрати (особливо на мікрозгинах);
- втрати у з'єднаннях (стиках) будівельних довжин;
- втрати, спричинені недоліками монтажу.

Згасання обмежує максимальну відстань, на яку можна передати сигнал без регенерації. Згасання обмежує також мінімальну відстань, на яку можна передати сигнал без вживання додаткових заходів щодо зниження його рівня. Максимально допустиме згасання в лінії визначається параметрами передавального та приймального пристрою.

Як видно з рис. 2.7 для передачі оптичних сигналів може бути використана широка ділянка спектра, де втрати у волокнах досить малі. Його прийнято розбивати більш вузькі ділянки – робочі діапазони, чи вікна прозорості.

Перше вікно прозорості через значну величину коефіцієнта згасання (2–2,5 дБ/км) використовується в основному в локальних обчислювальних мережах. Друге вікно прозорості (O – Original, основний діапазон) використовується переважно у міських та зонових лініях. Третє вікно прозорості (C – Conventional, стандартний діапазон) найбільш широко використовується в магістральних лініях. Четверте вікно прозорості (L – Long wavelength, довгохвильовий діапазон) та п'яте вікно прозорості (S – Short wavelength, короткохвильовий діапазон) разом з третім використовують в системах спектрального ущільнення.

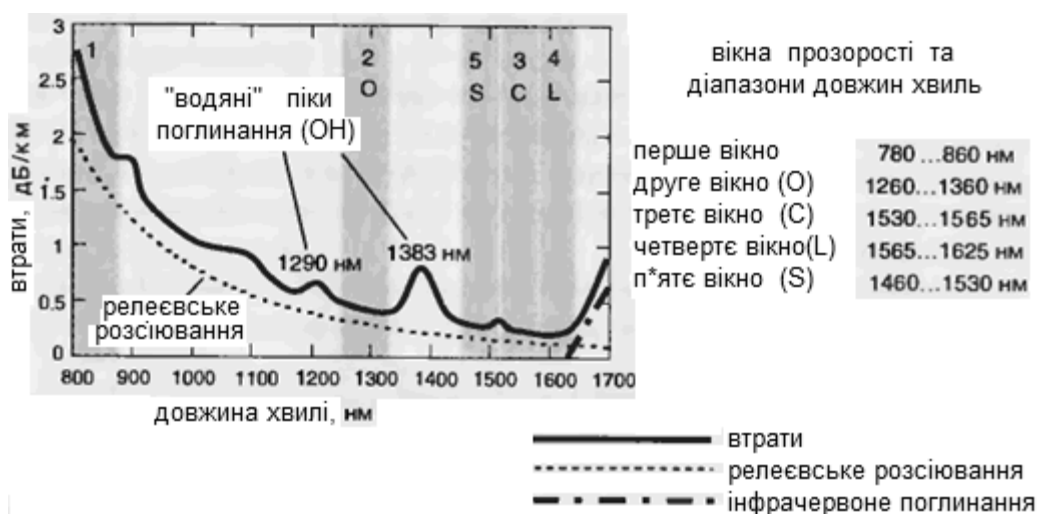


Рис. 2.7 – Залежність коефіцієнта згасання від довжини хвилі та положення вікон прозорості в кварцових ОВ

2.3 Виникнення втрат у вигнутому оптичному волокні

При прокладанні та монтажі оптичного кабелю неможливо уникнути вигинів ОВ. Радіус вигину оптичного кабелю при його стаціонарному прокладанні істотно впливає на його експлуатаційні характеристики. Вигин кабелю викликає відповідно вигин оптичного волокна, яке за певних умов може негативно відреагувати на цей механічний вплив, збільшивши втрати на проходження сигналу, або, в крайньому випадку, його руйнування. Згинальні деформації багато в чому визначають термін служби оптичних волокон [9].

Характерних місць згинів оптичних кабелів у зовнішній мережі телекомунікаційних станцій досить багато. Крім спіралеподібного вигину в самому кабелі, інші суттєві вигини волокон відбуваються в численних місцях зрощування або розгалуження кабелів та в різних внутрішньостанційних розподільних щитах. Технологія, що застосовується в точках розгалуження

та розподілу, ідентична технології, що застосовується в сполучних муфтах на трасі кабелю.

У зазначених вище місцях вигину волокно зазвичай прокладається відповідно до суворих приписів щодо мінімального радіусу вигину. Однак правильність укладання волокна залежить від уміння виконавця та ретельності виконання операції. Через фінансовий тиск з погляду зниження вартості трудових витрат іноді виникають випадкові помилки, у яких короткі довжини волокон піддаються вигинам із значно меншим радіусом, ніж передбачено. Це особливо характерно для трудомістких ділянок абонентських ліній, де потрібні численні зміни через перехід абонентів до іншого оператора, міграцію мережі та її реконструкцію. Дуже часто потрібно розводити абонентські лінії у місцях з обмеженим простором, наприклад у мережах усередині будівель. Тому не дивно, що у зв'язку з дедалі ширшим застосуванням одномодових волокон в абонентських лініях знову виникає проблема, пов'язана з макровигинами волокон. При використанні оптичних волокон, малочутливих до вигинів, характеристики мережі меншою мірою схильні до впливу таких дефектів і в той же час виявляються інші переваги монтажу ліній – зменшення габаритів пристроїв демонтажу ОВ (муфти, шафи, монтажні плати та ін.).

Домінуючими зовнішніми параметрами, чутливими до наявності макровигинів, є довжина хвилі та радіус вигину, як показано на рис. 2.8, на якому представлена залежність загасання стандартного одномодового волокна, що відповідає рекомендації G.652 ITU-T, від довжини хвилі та радіусу вигину. Тут чітко видно, що при значних довжинах хвиль, коли оптичний сигнал меншою мірою залежить від серцевини одномодового волокна, втрати на вигин значно зростають. Вони ще більше збільшуються, якщо радіус вигину зменшується, як показано на рис. 2.8б.

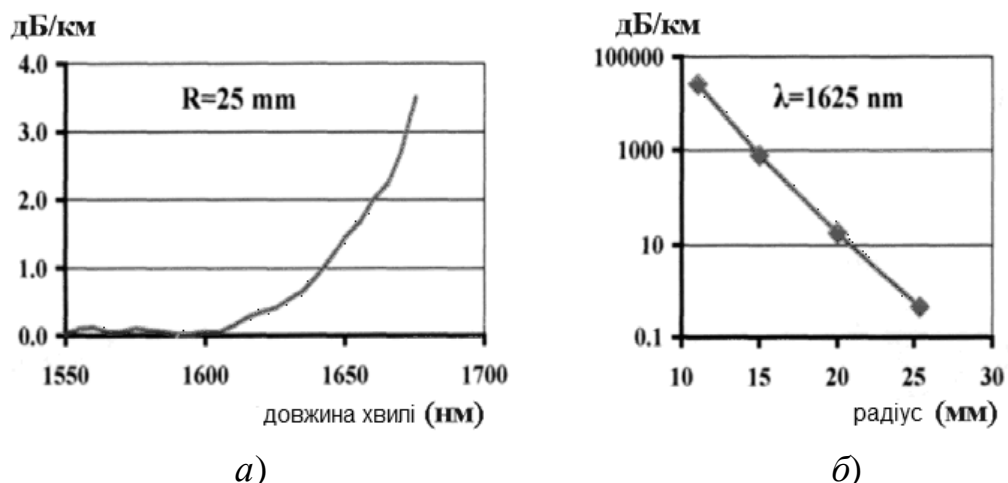


Рис. 2.8 – Залежність втрат, пов'язаних з макровигинами

У принципі це правильно, тому що зменшення радіусу згину призводить до появи додаткових напруг у зовнішній частині волокна та сили стиснення на внутрішній частині волокна. Однак ця додаткова напруга зазвичай досить мала у порівнянні з 1% подовженням, якому волокно піддається в процесі виробництва. Крім того, довжина вигнутого волокна на трасі невелика.

Таким чином, правильно спроектовані та прокладені мережі, магістральні або абонентські лінії, явно не страждають від ефектів макровигинів. Цьому сприяє помітне поширення оптичних волокон, менш чутливих до вигинів.

Важливо враховувати виникаючі в результаті згинів зміни характеристик волокна, виявлення цих змін і, бажано, їх запобігання. Оскільки вигини зазвичай викликають додаткові втрати, цей ефект буде виявлений тільки при введенні кабельної траси в експлуатацію після прокладання або заповнення конфігурації лінії зв'язку. Якщо не брати до уваги можливість вигинів з малим радіусом у самому кабелі, то вигин, що не відповідає вимогам специфікації, завжди буде результатом з'єднання волокон при зрощуванні.

Під час прокладання кабелю звичайною практикою є зрощення різних довжин кабелю. Індивідуальний контроль місць зрощування проводиться локально після виконання операції зрощування. Загальні втрати перевіряються під час приймання всієї траси, коли кожна оптична волоконна лінія випробовується за допомогою оптичного рефлектометра. Якщо виявляється дефектне місце зрощення, корпус з'єднувальної муфти має бути розкритий та зрощення має бути виконане заново. Повторний демонтаж однієї-двох сполучних муфт на канал зв'язку – звичайна справа при прийманні на протяжних міжміських лініях зв'язку та міських мережах. Кількість виявлених дефектів також залежить від кількості волокон у кабелі. Для кабелю з 192 волокнами ймовірність одного дефекту на сполучну муфту набагато вища, ніж для простого кабелю, що складається з 6 волокон. Процес повторного монтажу сполучної муфти досить складний і дорогий, оскільки потрібен додатковий час для того, щоб команда випробувачів і монтажників викопала, демонтувала корпус з'єднувального пристрою та виконала повторний монтаж. Особливе значення при цьому має випробувальна довжина хвилі. Втрати на зрощення самі собою навряд чи залежать від довжини хвилі, на відміну від втрат, викликаних вигинами в місці зберігання волокна при прокладанні. Оскільки за допомогою звичайного оптичного рефлектометра не можна розрізнити втрати, що виникають через зрощення, петель, що утворюються в місці зберігання при прокладці або випадкових згинах з малим радіусом, то не дивно, що розширена перевірка характеристик місця зрощення при довжині хвилі 1625 нм на кабелях, що пройшли, випробування при 1550 нм виявила велику кількість дуже високих втрат на зрощування при 1625 нм.

Аналіз показав, що ці дефекти були викликані як постійною кривизною чутливих до вигинів волокон у зоні місця зберігання, так і випадковими згинами через некваліфіковане поводження з оптичними волокнами.

Для випадкових згинів можна визначити два граничні значення:

- граничний термін служби;
- граничне значення втрат.

Щодо терміну служби, то радіус одиничного вигину може бути дуже малим, і це не вплине на термін служби. Домінуюче значення має гранична величина втрат, встановлена вимогами до втрат на зрощування. Втрати внаслідок випадкових згинів нижчі або порівняні із втратами на зрощування. Це означає, що можна уникнути відбраковування волокна при приймальних випробуваннях. Величина цього мінімального радіусу визначається залежно від чутливості волокна до вигинів.

При розповсюдженні світла в оптичних волокнах використовується принцип повного внутрішнього відбиття променів від межі розділу серцевина/оболонка. Принцип дотримується, якщо кут падіння променя досить великий, тобто світло падає полого до площини відбиття (рис. 1.2). При згинанні волокна з якимось малим радіусом порушується кутова умова, і частина випромінювання йде в оболонку, де потім і висвічується.

З погляду електродинаміки цей процес можна пояснити інакше. Поле випромінювання, що розповсюджується, концентруючись у серцевині, частково виходить в оболонку (тому діаметр модового поля завжди трохи більше діаметра серцевини), згасаючи за експоненційним законом.

Втрати при згинанні волокна виникають із двох причин. По-перше, втрати виникають у місці з'єднання прямого і вигнутого волокна та при переході від вигину до прямого волокна. Вони зумовлені тим, що у вигнутому волокні центр модової плями зміщений щодо осі волокна на деяку величину d , що залежить від радіусу згинання волокна (рис. 2.9а). В результаті модові плями прямого та вигнутого волокна у місці їх з'єднання виявляються зміщеними також на величину d (рис. 2.9б). Тому лише частина потужності моди прямого волокна (діаметром w) передається моді вигнутого волокна, а решта потужності перетворюється на моди оболонки та втрачається [10].

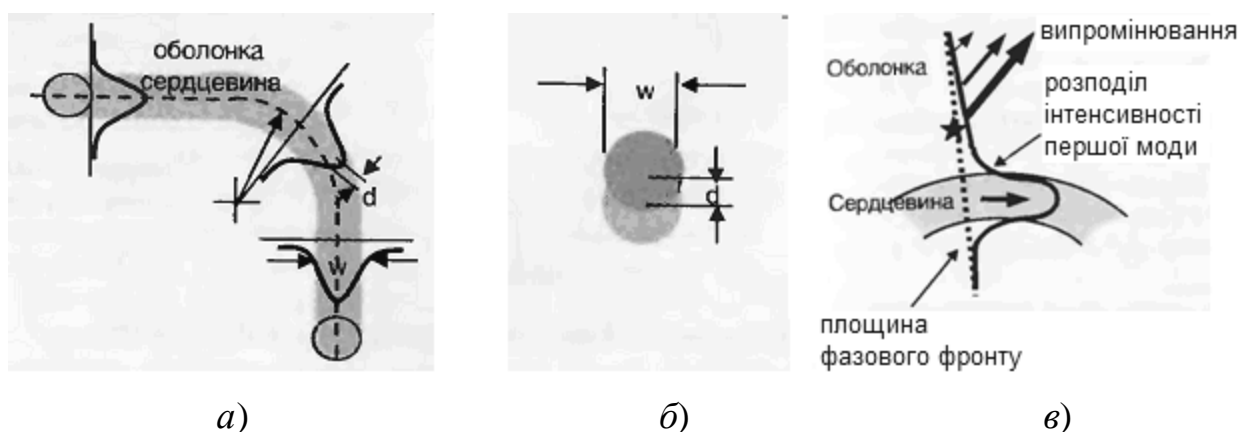


Рис. 2.9 – Виникнення втрат

По-друге, потужність губиться безпосередньо в самому вигнутому волокні. Це відбувається через те, що у вигнутому волокні периферійна частина моди поширюється зі швидкістю більшої за швидкість світла в середовищі (в оболонці). Ця частина моди випромінюється в оболонку волокна й у результаті губиться (рис. 2.9в). Величина цих втрат тим більше, чим більше число витків волокна та чим менше радіус вигину волокна.

Таким чином, втрати у вигнутому волокні виникають через два різні механізми. У першому випадку втрати залежать тільки від радіусу згинання волокна і не залежать від числа витків. А в другому – вони залежать і від радіусу згину, і від числа витків.

Інтенсивність випромінювання в ОВ залежить як від довжини хвилі випромінювання (λ), так й від радіусу серцевини (a) та від різниці показників заломлення між серцевиною та кварцовою оболонкою ($n_1 - n_2$). З цих параметрів можна утворити безрозмірну комбінацію, яка часто використовується при розрахунках і називається параметром волокна V :

$$V = k a NA = (2\pi/\lambda) a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.12)$$

де: - $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число (у вакуумі);

- a – радіус серцевини;

- $NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ – числова апертура.

Параметр волокна V однозначно характеризує відносні потужності, що розповсюджуються в серцевині та в оболонці волокна (рис.2.10).

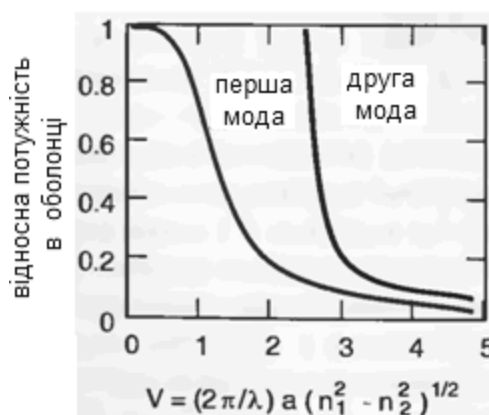


Рис. 2.10 – Частки потужностей першої та другої мод, що поширюються в оболонці волокна

З рис. 2.10 видно, що при $V < 1$ практично вся потужність першої моди зосереджена в оболонці та, при згинанні волокон з таким малим параметром V , втрати випромінювання будуть значними.

Характерно також, що крива відносної потужності першої моди не обривається при $V \rightarrow 0$. Це означає, що теоретично в волокні може поширюватися випромінювання з будь-якою великою довжиною хвилі (тобто основна мода волокна не має відсічення). Але при $V \rightarrow 0$ основна частина потужності поширюється поза серцевиною та втрати на згинах таких волокон великі.

При $V > 1$ частка потужності основної моди, що поширюється в оболонці, швидко зменшується зі зростанням V , відповідно зменшуються втрати при згині волокна. Подальше збільшення параметра V є недоцільним, оскільки при $V > 2,4$ у волокні вже може поширюватися друга мода.

Мінімальна довжина хвилі, коли у волокні поширюється лише одна мода, називається довжиною хвилі відсічки. Отже, якщо волокно пряме, то в

ньому поширюються дві моди. Але другу моду можна відсікти, зігнувши волокно.

На відміну від теоретичної довжини хвилі відсікання, яку можна розрахувати, ефективна довжина хвилі відсікання, що використовується на практиці (стандарт *ITU-T, G.650*), залежить від довжини волокна та наявності в ньому згинальних деформацій. Після укладання волокна в оптичний кабель згинальних деформацій в волокні стає більше. Тому максимально можлива довжина хвилі відсічення в кабелі завжди менше максимально можливої довжини хвилі відсічення у волокні.

Відомо, що в стандартних одномодових волокнах типу *G.652* зі зростанням довжини хвилі згасання на вигинах збільшується. Це пояснюється тим, що чим далі від довжини хвилі відсічення (1260 нм) випромінювання в ОВ, тим більше воно виходить в оболонку, збільшуючи діаметр модового поля. Чим ближче робоча довжина хвилі до довжини хвилі відсічення, тим краще волокно проводить світло та менше величина додаткових втрат, що виникають при згинах такого волокна.

Отже, повне внутрішнє відбиття, яке має місце у прямолінійному хвилеводі, порушується внаслідок вигину. При обчисленні втрат на випромінювання будемо використовувати геометричну оптику для визначення траєкторії променя всередині серцевини вигнутого хвилеводу та відповідний коефіцієнт проходження потужності при визначенні втрат в точках повороту або відбиття. Повні втрати на випромінювання дорівнюють сумі втрат уздовж усіх траєкторій променів. Для многомодових волокон втрати на згині дуже мали, оскільки радіус вигину, як правило, надзвичайно великий у порівнянні з розмірами серцевини.

На підставі вищевикладеного можна зробити висновок про те, що при згинах волокна, як і раніше, потрібна деяка обережність, але оптимізація конструкцій волокна, що триває, забезпечує його відповідність все більш жорстким вимогам до монтажу та прокладення.

Кожному виробнику волокна доводиться йти на компроміс під час створення оптимальної конструкції оптичного волокна. Оптимізація власних параметрів волокна, що визначають стійкість до макровигинів, вплине і на інші параметри волокна, такі як дисперсія, власні втрати волокна, та останній, але не менш важливий параметр – продуктивність при виготовленні волокна. Крім того, деякі інші параметри, такі як точний профіль показника заломлення серцевини волокна та поперечний розподіл механічного навантаження, також впливають на стійкість до вигинів, хоча меншою мірою, ніж значення відношення діаметра модової плями до довжини хвилі відсічення [11].

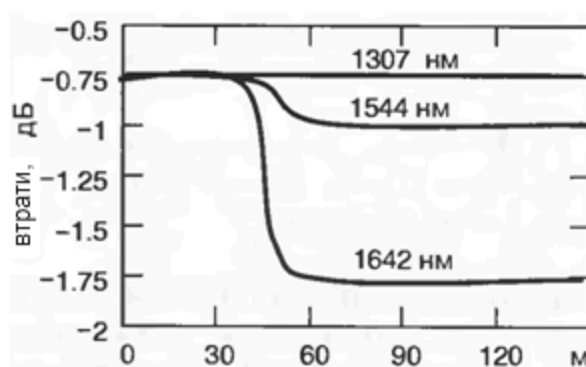


Рис. 2.11 – Рефлектограми втрат у SM-волокні на трьох довжинах хвиль

З рис. 2.11 видно, що у вигнутому волокні втрати збільшуються із збільшенням довжини хвилі. Пояснюється це тим, що збільшується діаметр моди і дедалі більша частина потужності моди випромінюється в оболонку волокна. Цей факт використовується в рефлектометрії для пошуку місць згинання волокон. Тобто, діаметр моди і, відповідно, відносні потужності, що розповсюджуються в серцевині та оболонці волокна, залежать не тільки від довжини хвилі.

3 РОЗРАХУНОК ВТРАТ У ВИГНУТИХ СТАНДАРТНИХ ОПТИЧНИХ ВОЛОКНАХ

3.1 Розрахунок поля основної моди волокна

На рис. 3.1 представлено ОВ круглого поперечного перерізу та осі декартових і циліндричних координат, що використовуються при описі полів мод.

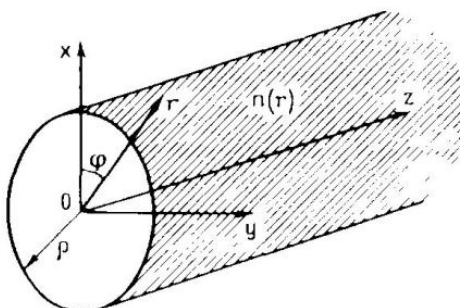


Рис. 3.1 – ОВ з необмеженими розмірами вздовж осей r та z

Радіус серцевини волокна позначимо літерою a . Замість циліндричної радіальної координати r (відстань від оптичної осі волокна до точки, що розглядається) будемо використовувати її нормоване значення: $R = r/a$.

Розроблена в цьому розділі методика застосовна до волокон з осесиметричним профілем показника заломлення, який можна подати у вигляді [10]:

$$n^2(R) = n_{c0}^2 [1 - \Delta \cdot f(R)], \quad (3.1)$$

де: - n_{c0} – максимальне значення показника заломлення серцевини волокна;

- $f(R)$ – функція зміни показника заломлення (функція профілю);

- Δ – параметр висоти профілю або відносна різниця показників заломлення серцевини та оболонки, яка для ОВ з постійним показником заломлення оболонки n_{c1} визначається виразом:

$$\Delta = \frac{n_{c0}^2 - n_{cl}^2}{2n_{c0}^2} \quad (3.2)$$

Просторовий розподіл поля основної моди $F_0(R)$ є рішенням скалярного хвильового рівняння, яке для слабонаправлених ОВ круглого поперечного перерізу має вигляд:

$$\left[\frac{d^2}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{d}{dR} + U^2 - V^2 f(R) \right] F_0(R) = 0 \quad (3.3)$$

де: - $U = a\sqrt{k^2 n_{c0}^2 - \beta^2}$ – параметр моди в серцевині;

- k – хвильове число;

- V – нормована частота;

- β – стала поширення основної моди, яка визначається як:

$$\beta = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{V^2}{2\Delta} - U^2} \quad (3.4)$$

Рівняння (3.3) має точне аналітичне рішення для слабонаправляючих ОВ зі ступінчастим профілем показника заломлення, що описується виразами:

$$n(R) = \begin{cases} n_{c0} & , 0 \leq |R| < 1 \\ n_{cl} & , |R| > 1 \end{cases} \quad (3.5)$$

Функція профілю для такого волокна має вигляд:

$$f(R) = h(R-1) + h(-R-1) \quad (3.6)$$

де $h(x)$ – функція Хевісайда.

Розв'язок рівняння (3.3) для поля основної моди $F_0(R)$ слабонаправляючого ОВ зі ступінчастим профілем показника заломлення з урахуванням нормування ($F_0 = 1$ при $R = 1$) має вигляд:

$$F_0(R) = \begin{cases} \frac{J_0(UR)}{J_0(U)} & , 0 \leq R < 1 \\ \frac{K_0(WR)}{K_0(W)} & , R \geq 1 \end{cases} \quad (3.7)$$

де: - J_0 – функція Беселя першого роду;

- K_0 – модифікована функція Беселя другого роду;

- $W = a\sqrt{\beta^2 - k^2 n_{cl}^2}$ – параметр моди в оболонці.

Параметр W можна зв'язати з U через нормовану частоту:

$$V^2 = U^2 + W^2. \quad (3.8)$$

Розрахувати параметри моди в серцевині U та в оболонці W можна, вирішивши характеристичне рівняння:

$$U \frac{J_0(UR)}{J_0(U)} = W \frac{K_0(WR)}{K_0(W)}. \quad (3.9)$$

На рис. 3.2а представлені результати розрахунку залежностей U та W від нормованої частоти – параметри основної моди в серцевині та оболонці.

На рис. 3.2б наведено результати розрахунку нормованого розподілу поля основної моди для різних значень нормованої частоти V – розподіл поля основної моди у поперечному перерізі волокна.

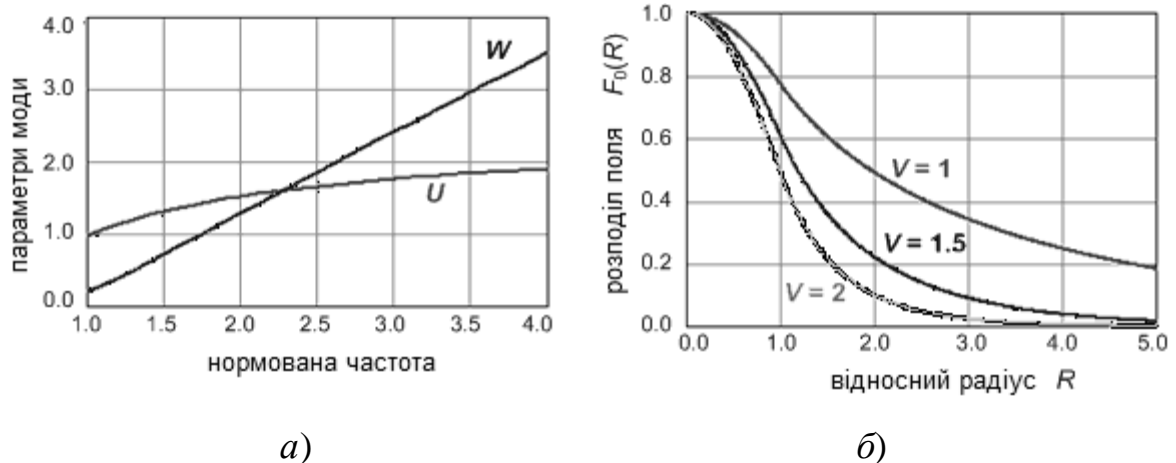


Рис. 3.2 – Результати розрахунку

Повна потужність основної моди визначається виразом:

$$P_0 = |A|^2 N, \quad (3.10)$$

де: - A – амплітуда моди;

- N – коефіцієнт нормування, що дорівнює:

$$N = \frac{\pi \alpha^2 n_{c0}}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \frac{V^2}{U^2} \frac{K_1^2(W)}{K_0^2(W)}, \quad (3.11)$$

де: - $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вільного простору;

- $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнітна проникність вільного простору.

3.2 Розрахунок коефіцієнта загасання вигнутої ділянки волокна

Розглянемо один із основних механізмів втрат випромінювання в вигнутій ділянці ОВ. У прямому волокні з довільним профілем показника заломлення поле моди в кожній точці поперечного перерізу поширюється паралельно осі волокна з постійною фазовою швидкістю, тому площина постійної фази їй ортогональна. Якщо волокно вигнуте в плоску дугу з постійним радіусом R_c (рис. 3.3), то поля і фазові фронти обертаються навколо центру кривизни вигину з постійною кутовою швидкістю.

Таким чином, фазова швидкість, паралельна осі волокна, має лінійно зростати зі збільшенням відстані від центру кривизни C . Оскільки оболонка волокна має постійний показник заломлення, фазова швидкість може перевищувати швидкість світла в даному середовищі. Тому має існувати деякий радіус R_{rad} у площині вигину, при перевищенні якого поле вже не може прямувати та має ставати випромінюючим, як схематично зображено на рис. 3.3а, де зображено ділянка вигнутого ОВ.

На рис. 3.3б представлено еквівалентне обурення, апроксимоване наведеним струмом із щільністю J (стрілки), що займає область серцевини волокна.

Для розрахунку втрат потужності, пов'язаних з частковим випромінюванням поля на вигині, можна використовувати наближену модель волокна, згідно з якою вигнуте волокно представляється струмової антеною

нескінченно малої товщини, що випромінює в необмежене середовище з показником заломлення, рівним показнику заломлення оболонки.

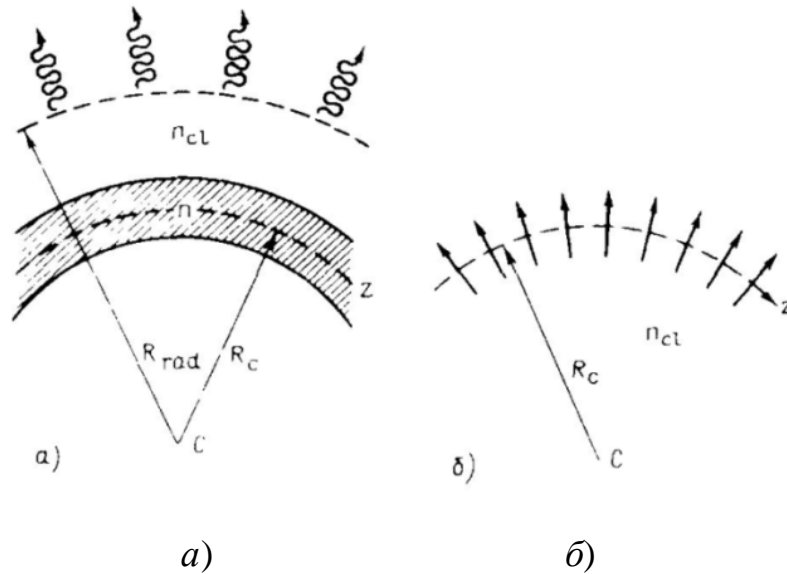


Рис. 3.3 – Розповсюдження випромінювання

У межах наближення слабонаправляючого хвилеводу випромінювана потужність залежить від стану поляризації хвилі, за умови $R_c \gg a$. Для цього випадку повна випромінювана з вигнутого волокна потужність дорівнюватиме:

$$P_{rad} = \frac{\pi R_c^2}{8a^2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{V^2}{n_{c0}} \frac{|I_c|^2}{\Delta} \int_0^\pi J_v^2(kR_c n_{cl} \sin \theta) \sin^3 \theta d\theta, \quad (3.12)$$

де: - $v = \beta R_c$;

- I_c величина, що задається виразом –

$$I_c = -2\pi i A n_{c0} a V \sqrt{\frac{2\Delta\varepsilon_0}{\mu_0}} \int_0^\infty [1 - f(R)] F_0(R) R dR. \quad (3.13)$$

Частка потужності, випромінювана з петлі довжиною $2\pi R_c$, визначається відношенням повної випромінюваної потужності до початкової потужності моди:

$$\frac{P_{rad}}{P_0} = \frac{\sqrt{\pi}}{32} \left| \frac{I_c}{A} \right|^2 \sqrt{\frac{R_c}{a}} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{V^2}{n_{c0}} \frac{V^2}{W^{3/2}} \frac{n_{\bar{n}0}}{N\Delta} \exp\left(-\frac{4R_c\Delta W^3}{3aV^2}\right). \quad (3.14)$$

З формул (3.13–3.14) випливає, що частина потужності, що втрачається на одиниці довжини, або коефіцієнт загасання потужності γ , [Нп/м]:

$$\gamma = \sqrt{\frac{\pi V^8}{16aR_c W^3}} \exp\left(-\frac{4R_c\Delta W^3}{3aV^2}\right) \frac{\left[\int_0^\infty (1-f(R))F_0(R)RdR \right]^2}{\int_0^\infty F_0^2(R)RdR}. \quad (3.15)$$

Домінуючою у цьому виразі є експоненційна залежність коефіцієнта загасання від відношення радіуса вигину до радіусу серцевини волокна, оскільки при $R_c \gg a$ коефіцієнт загасання дуже малий та відносно «нечутливий» до інших множників в (3.15).

З формули (3.15) можна отримати вираз для коефіцієнта загасання потужності основної моди вигнутого слабонаправляючого волокна зі ступінчастим профілем показника заломлення:

$$\gamma = \frac{\sqrt{\pi}}{2a} \sqrt{\frac{a}{R_{\bar{n}}}} \frac{V^2 \sqrt{W}}{U^2} \exp\left(-\frac{4R_c\Delta W^3}{3aV^2}\right). \quad (3.16)$$

Отриманий вираз для коефіцієнта загасання потужності основної моди у вигнутому волокні зі ступінчастим профілем показника заломлення не враховує ефектів, пов'язаних з тим, що поперечні розміри серцевини волокна кінцеві. Це можна врахувати, помноживши коефіцієнт загасання, розрахований за виразом (3.15), на масштабний множник M :

$$M = \left[\frac{\int_0^\infty (1-f(R))F_0(R)I_0(WR)RdR}{\int_0^\infty (1-f(R))F_0(R)RdR} \right]^2. \quad (3.17)$$

Для волокна зі ступінчастим профілем показника заломлення масштабний множник M набуде вигляду:

$$M = \left[\frac{U^2}{WV^2 K_1(W)} \right]^2. \quad (3.18)$$

Таким чином, вираз (3.16) з урахуванням множника (3.18) може бути поданий у вигляді:

$$\gamma = \frac{\sqrt{\pi}}{2a} \sqrt{\frac{a}{R_n}} \frac{U^2}{V^2 W^{3/2}} \frac{1}{K_1^2(W)} \exp\left(-\frac{4R_c \Delta W^3}{3aV^2}\right). \quad (3.19)$$

Крім втрат на випромінювання, пов'язаних із вигином волокон, існують перехідні втрати, обумовлені різкою зміною радіуса кривизни вигину, як це показано на рис. 3.4 у перерізі $A-A'$.

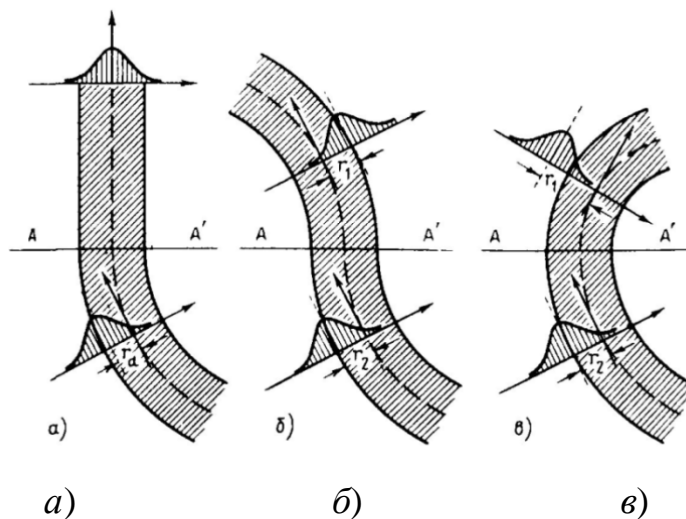


Рис. 3.4 – Якісне уявлення зрушень поля основної моди

На рис. 3.4а наведено зрушення поля основної моди, обумовлене поодиноким вигином; на рис. 3.4б – двома вигинами з протилежними радіусами кривизни; 3.4в – двома вигинами з різними радіусами вигину.

Причиною втрат тут є неузгодженість втрат, і тому поле, що падає, збуджує не тільки локальні моди, але й моди випромінювання, які й визначають перехідні втрати.

Основний вплив вигину на поле основної моди проявляється у зсуві розподілу поля у площині вигину у радіальному напрямку від центру кривизни на відстань r_d від осі волокна. У разі ОВ з довільним профілем у рамках гаусового наближення маємо:

$$r_d = \frac{V^2}{2\Delta} \cdot \frac{a^2}{R_c} \left(\frac{r_0}{a} \right)^4, \quad (3.20)$$

де: - r_0 – розмір плями моди;

- R_c – радіус вигину ($R_c \gg a$).

Якщо волокно одномодове, то частина потужності падаючої моди, яка перетворюється на спрямовану, визначається співвідношенням:

$$\frac{P_0}{P_i} = \left(2\rho_s r_0 / (\rho_s^2 + r_0^2) \right)^2 \exp(-r_d^2 / (\rho_s^2 + r_0^2)), \quad (3.21)$$

де

$$\rho_s = r_0 + r_d. \quad (3.22)$$

Тоді частина випромінюваної потужності (перехідні втрати) при $r_d \ll r_0$ рівні:

$$1 - \frac{P_0}{P_i} \approx 1 - \exp(-r_d^2 / 2r_0^2) \approx \left(\frac{a}{R_c} \right)^2 \left(\frac{r_0}{a} \right)^2 \frac{V^4}{8\Delta^2}. \quad (3.23)$$

Цей результат справедливий при падінні хвилі на площину $A-A'$ з будь-якої сторони.

Якщо волокно має велику кількість випадкових згинів з довільним радіусом кривизни та довжиною дуги, що характерно для мікрозгинів, то випромінювання на цих згинах є некорельованим. Тому повні втрати від вигинів та перехідних ділянок можуть бути знайдені простим підсумовуванням. Тому повні втрати на мікрозгинах вздовж волокна дорівнюють сумарній потужності, випромінюваної за всіма згинами та перехідними ділянками.

Якщо відношення радіусів вигину та серцевини значне, що, як правило, реалізується на практиці, то для визначення втрат на мікрозгинах можуть бути використані вище наведені формули. Тож якщо радіус вигину великий, то перехідні втрати домінують над втратами від «чистого» вигину, оскільки останні мають експоненційну залежність від радіусу кривизни вигину.

3.3 Практичний розрахунок згинальних втрат

Розрахунок згинальних втрат проводитимемо для оптичних волокон, параметри яких близькі до параметрів волокон відомих виробників. У табл. 3.1 наведено параметри волокон із ступінчастим профілем показника заломлення, для яких проводилися розрахунки.

Таблиця 3.1 – Параметри волокон, що розраховувались

Параметр		<i>Corning:</i> SMF-28, SMF-28e (стандартне одномодове ОВ)	<i>OFS:</i> SM-332 (одномодове ОВ із узгодженою оболонкою)	<i>Samsung Electron.:</i> SF-SMF-x (одномодове ОВ зі ступінч. профілем показника заломл.)
Діаметр модового поля, мкм	$\lambda_0 = 1310$ нм	$9,2 \pm 0,4$	$9,2 \pm 0,4$	$9,2 \pm 0,4$
	$\lambda_0 = 1550$ нм	$10,4 \pm 0,8$	$10,5 \pm 1,0$	$10,4 \pm 0,8$
Параметр висоти профілю, %		$0,36$	$0,33$	$0,34$

В даній магістерській роботі моделювання та експериментальні дослідження проводились із волокном марки SMF-28. Оскільки хімічний склад серцевини та оболонки цього волокна невідомий, під час розрахунку припустимо, що оболонка такого ОВ виготовлена з чистого кварцу, а серцевина легована домішками, що збільшують показник заломлення. Склад скла оболонки виберемо, виходячи з відомої висоти профілю.

Необхідний для проведення розрахунків радіус серцевини волокна a можна оцінити з використанням наближеного виразу для радіусу модового поля w :

$$w = \frac{a}{\sqrt{\ln\left(\frac{2\pi \cdot a \cdot NA}{\lambda}\right)}}, \quad (3.24)$$

де NA – числова апертура, що визначається виразом (1.5).

Оскільки діаметр модового поля w для кожного волокна відомий, то рівняння (3.24) можна розв'язати відносно a чисельним методом.

Отримані для кожного із зазначених у табл. 3.1 ОВ параметри зведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Параметри складу ОВ, що розраховувались

Параметр	<i>Corning</i> : SMF-28, SMF-28e (стандартне одномодове ОВ)	<i>OFS</i> : SM-332 (одномодове ОВ із узгодженою оболонкою)	<i>Samsung Electron</i> : SF-SMF-x (одномодове ОВ зі ступінч. профілем показника заломл.)
Хімічний склад оболонки волокна	100% SiO_2	100% SiO_2	1% F , 99% SiO_2
Хімічний склад серцевини волокна	3.5% GeO_2 , 96.5% SiO_2	3.1% GeO_2 , 96.9% SiO_2	100% SiO_2 (з домішками)
Радіус серцевини волокна, мкм	4.70	4.60	4.60

Для розрахунку залежностей показників заломлення серцевини та оболонки волокна від довжини хвилі використовувалося відоме рівняння Селлмейєра:

$$n(\lambda) = \sqrt{\sum_{i=0}^2 \frac{A_{si} \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_{si}^2} + 1}, \quad (3.25)$$

де A_{si} та λ_{si} ($i = 0, 1, 2$) – коефіцієнти Селлмейєра, які для різних стекел наведені в [10].

Графіки залежності показників заломлення сердцевини та оболонки від довжини хвилі для модельованого волокна SMF-28, розраховані за виразом (3.25), представлені на рис. 3.5а. Нормовані функції розподілу поля основної моди для волокна SMF-28 на різних довжинах хвиль наведені на рис. 3.5б.

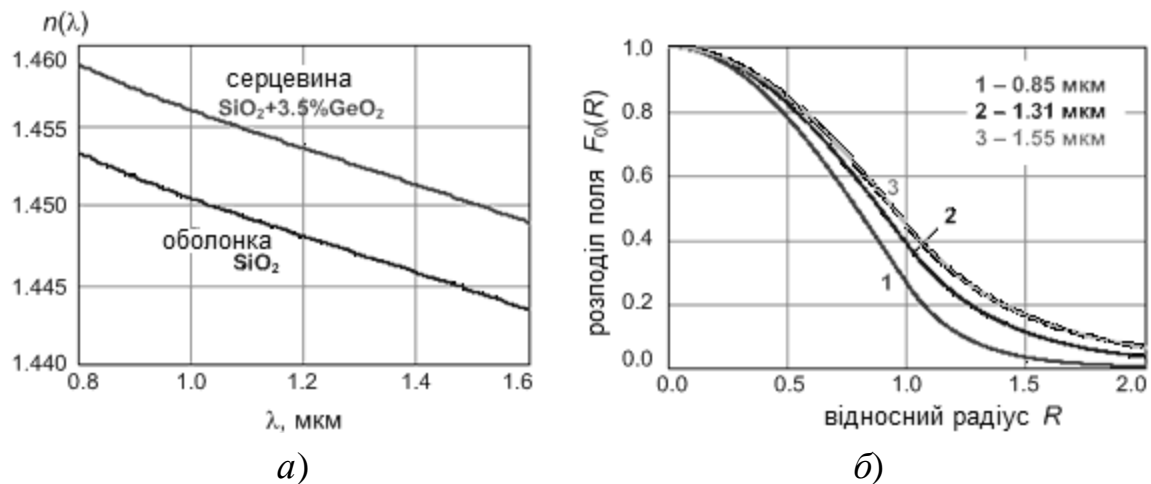


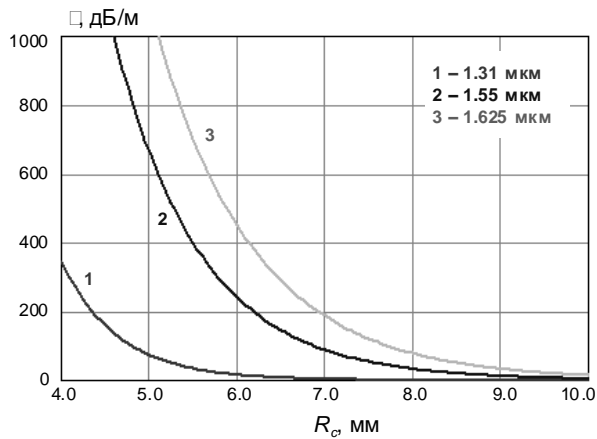
Рис. 3.5 – Графіки залежностей для волокна SMF-28 (Corning)

На рис. 3.6а представлені залежності коефіцієнта згасання вигнутої ділянки волокна SMF-28 від радіусу згину на різних довжинах хвиль. Розрахунки проведені для довжин хвиль двох основних вікон прозорості – 1310 нм та 1550 нм, а також для довжини хвилі позасмугового контролю – 1625 нм. З цього рисунка видно, що із зменшенням радіусу вигину втрати швидко зростають. Крім того, видно, що втрати зростають із зростанням довжини хвилі.

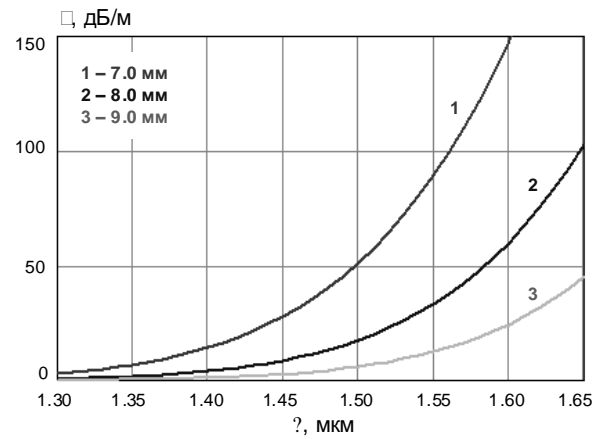
На рис. 3.6б представлені залежності коефіцієнта загасання вигнутої ділянки волокна SMF-28 від довжини хвилі за різних радіусів вигину (з практичних випадків $r = 7, 8, 9$ мм).

Подані результати зіставлені з експериментально вимірними значеннями величин. Відхилення результатів не перевищує 10%.

Нижче наведено результати розрахунку коефіцієнтів загасання вигнутих ділянок для двох інших модельованих волокон з табл. 3.1–3.2.



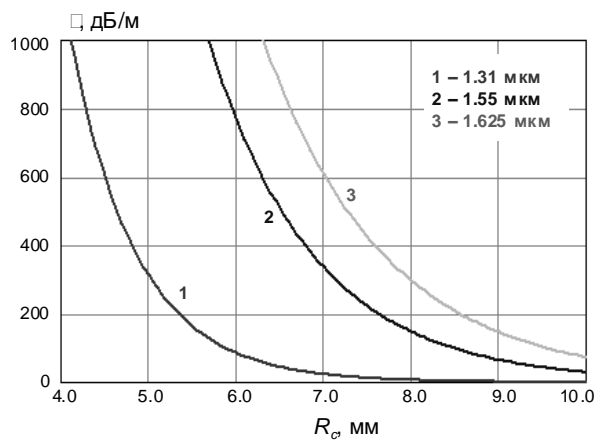
а)



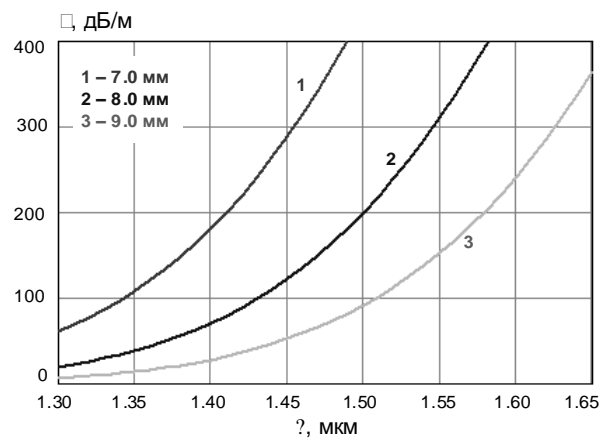
б)

Рис. 3.6 – Залежності коефіцієнта згасання вигнутої ділянки волокна

Для вигнутої ділянки волокна SM-332 (OFS) на рис. 3.7а показана залежність коефіцієнта згасання від радіусу вигину на різних довжинах хвиль, а на рис. 3.7б – залежність коефіцієнта згасання від довжини хвилі за різних радіусів вигину.



а)



б)

Рис. 3.7 – Графіки залежностей для волокна SM-332 (OFS)

Для вигнутої ділянки волокна SF-SMF-x (*Samsung Electronics*) на рис. 3.8а показана залежність коефіцієнта згасання від радіусу вигину на різних довжинах хвиль, а на рис. 3.8б – залежність коефіцієнта згасання від довжини хвилі за різних радіусів вигину.

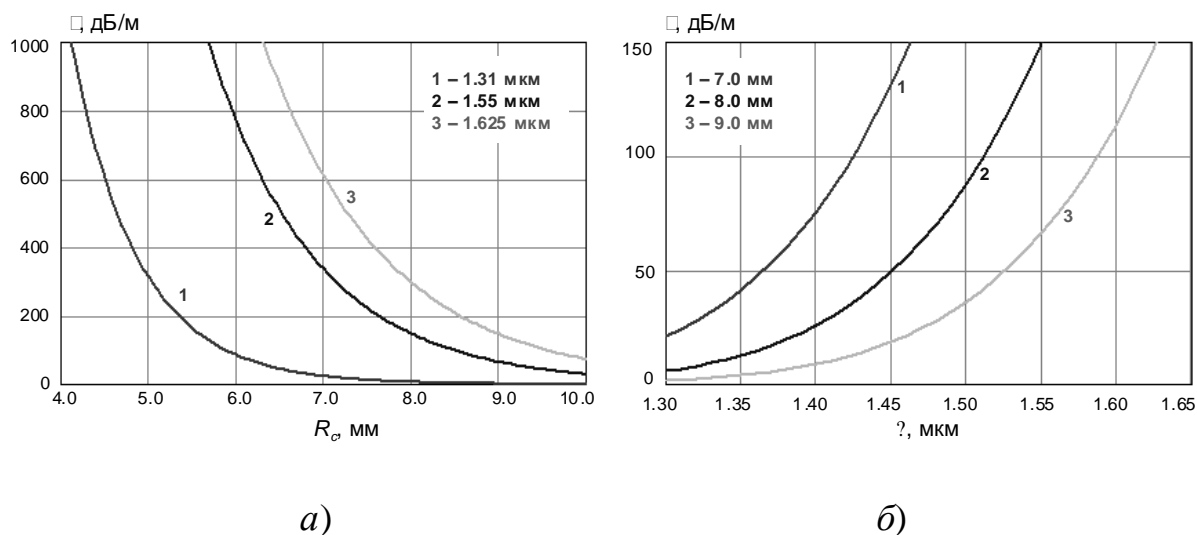


Рис. 3.8 – Графіки залежностей для волокна SF-SMF-x (*Samsung Electronics*)

Проведені розрахунки показали, що втрати у вигнутій ділянці волокна істотно залежить від його конструкції. Наприклад, було помічено, що вони зменшуються зі збільшенням висоти профілю. У табл. 3.3 представлені результати розрахунку коефіцієнта загасання вигнутої ділянки для волокон з чисто кварцовою оболонкою, діаметром серцевини 4,5 мкм і різною величиною висоти профілю, яка досягалася використанням для серцевини германієво-силікатного скла з різною концентрацією легуючої домішки оксиду германія.

Вигини волокна спричиняють додаткові в ньому втрати. Допустимий радіус вигину нормується для різних типів оптичних волокон. Вигини можуть також спеціально створюватися для введення та виведення випромінювання через бічну поверхню волокна.

Таблиця 3.3 – Результати розрахунку коефіцієнта загасання

Концентрація легуючої домішки GeO_2 , %		3,1	3,5	4,1	5,8	7,0	7,9	13,5
Висота профілю на довжині хвилі 1,55 мкм		0,0032	0,0038	0,0043	0,0061	0,0078	0,0083	0,0149
Коеф. загасання вигнутої ділянки (дБ/м) з радіусом	3 мм	12593,1	6140,0	2500,2	48,4	0,31	0,044	$7,6 \cdot 10^{-15}$
	4 мм	5539,6	1971,8	558,1	2,47	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	≈ 0.0
	5 мм	2516,7	654,0	128,7	0,13	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$8,2 \cdot 10^{-7}$	≈ 0.0
	6 мм	1167,0	221,4	30,28	0,007	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-9}$	≈ 0.0

Очевидно, що згинальні втрати швидко зменшуються зі зростанням висоти профілю. Однак збільшення висоти профілю призводить до погіршення інших параметрів волокна, наприклад, зменшення діаметра модового поля.

Такі вигини можуть використовуватися в зварювальних апаратах для вимірювання втрат, що вносяться в з'єднаннях волокон (система LID), та при організації службового зв'язку.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці на робочому місці

Розглянемо умови праці в приміщенні обчислювального центру, розміром 9x4x3,5 м, що має 2 вікна (2,5x2,2 м) та розташоване на першому поверху 4-х поверхового будинку, де працюють шість операторів на ПК.

При роботі в обчислювальному центрі присутні такі фактори, що негативно впливають на працездатність та здоров'я операторів:

- зорова втома;
- напружена розумова праця;
- електромагнітне випромінювання;
- електростатичне поле, іонізація;
- інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання;
- електричний струм у мережі до 1000 В.

Розглянемо ці шкідливі чинники докладніше.

При роботі за комп'ютером очі знаходяться в постійній нарузі, це пов'язано з тим, що монітор сам є джерелом світла, що не звично для людського ока, так як в основному ми бачимо відбите від об'єктів світло, водночас мерехтіння зображення теж дратує очі. За різними даними частота проявів зорового втоми в користувачів комп'ютерів коливається від 10-40% – щодня до 40-92% – час від часу.

Зорова втома під час роботи з комп'ютером обумовлюється особливостями роботи з цим пристроєм. При цьому слід відзначити наступні принципові відмінності зображення на екрані від традиційного друкованого тексту:

- зображення на екрані є самосвітнім, тоді як друкований текст сприймається тільки у відбитому світлі;
- зображення на екрані формується дискретними точками (пікселями) або лініями растру, тоді як друковані знаки утворені безперервними лініями,

значення яскравості зображення на екрані піддається коливанням всередині одного символу (знака);

- зображення на екрані характеризується періодичним мерехтінням, основною часовою характеристикою якого є швидкість регенерації, що виражається у герцах;

- швидкість розгортки, що здійснюється на очах у оператора;

- екран покритий склом, що дає відблиски від зовнішніх джерел світла.

Крім цього, на зорове стомлення впливає необхідність постійного переміщення погляду з екрана на клавіатуру, а також можливі похибки в організації робочого місця неправильна відстань від очей до екрана, відблиски на екрані від зовнішніх джерел світла та надто велика яскравість екрану.

Зазначені положення можуть бути причиною розвитку втоми в рецепторних механізмах і структурах первинного аналізу (на рівні обробки сигналу в сіпківці), тобто сенсорної нейрорецепторної втоми зорового аналізатора. Це призводить до підвищеної втоми зору та загальної втоми.

Напружена розумова праця – один із важливих факторів, що впливають на працездатність персоналу. Тому значна увага має приділятися вивченню умов, що впливають на працездатність, та причин стомлюваності, а також раціоналізації праці, розроблення заходів щодо підвищення працездатності, профілактики втоми, як окремих м'язових груп органів та систем, так і організму в цілому, попередження професійних захворювань, що викликаються напруженою працею.

При раціональній організації трудових процесів слід передбачати по можливості рівномірне чергування різноманітних операцій, як за своїм характером, так і за їх напруженістю, зберігаючи при цьому певний ритм роботи. Необхідно стежити, щоб наявні у роботі короточасні паузи рівномірно розподілялися протягом усієї зміни. Незважаючи на наявність короточасних пауз, незалежно від напруженості праці передбачаються

перерви в роботі (як правило, в середині робочого дня), які служать для прийому їжі та відпочинку.

При виконанні розумової напруженої праці або роботах монотонного характеру зі значною статичною напругою влаштовуються додаткові перерви від 5 до 15 хвилин. Час і тривалість відпочинку визначаються характером праці, його тяжкістю, напруженістю, включаючи його інтенсивність, настанням втоми та станом зовнішнього виробничого середовища. Найчастіше у першій половині робочого дня перерви рекомендується робити коротші й рідші, тоді як у другій половині – частіші й триваліші. Після важких періодичних та напружених операцій доцільно зробити перерву. При однотипній роботі короткочасні паузи доцільно робити не тоді, коли настало стомлення, а перед його настанням.

При багатьох видах робіт, і особливо пов'язаних зі статичною напругою та одноманітними монотонними рухами, а також за напруженої розумової праці доцільно відпочити, активно рухаючись, за участю тих м'язових груп, які не діють під час праці. Для цього розроблено цілий комплекс виробничої гімнастики, який рекомендується виконувати під час перерв.

Як і всі прилади, що споживають електроенергію, ПК випускає електромагнітне випромінювання, що має значний вплив із зменшенням відстані від джерела (системного блоку, монітора) до об'єкта (оператора). ПК є найнебезпечнішим джерелом електромагнітного випромінювання. Електромагнітне випромінювання може викликати розлади нервової системи, зниження імунітету, розлади, серцево-судинної системи та аномалії в процесі вагітності та відповідно згубний вплив на плід.

Для захисту від електромагнітного випромінювання слід виконувати такі вимоги:

- використовувати рідкокристалічні та TFT монітори, оскільки їх випромінювання значно менше інших;
- системний блок та монітор має знаходитися якнайдалі від оператора;

- не залишати увімкненим ПК на тривалий час, якщо ним не користуються;
- використовувати "сплячий режим" для монітора;
- поставити монітор у кут, так щоб його випромінювання додатково поглиналося стінами;
- за можливості скоротити час роботи за ПК та частіше робити перерви у роботі;
- ПК має бути заземлений.

4.2 Виробнича санітарія

Для ослаблення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів при роботі з ПК є санітарні правила та норми СанПіН 2.2.2.542-96 [12]. Подамо санітарно-гігієнічні вимоги у вигляді табл. 5.1-5.6.

Таблиця 5.1 – Основні вимоги до площі приміщення (на робоче місце)

Параметр	Дорослі користувачі	Учні та студенти
Площа, м ²	6	6
Об'єм, м ³	20	24

Таблиця 5.2 – Значення коефіцієнта відбиття забарвлення

Параметр	Стеля	Стіни	Підлога
Мінімальне значення коефіцієнт відбиття	0,7	0,5	0,3
Максимальне значення коефіцієнт відбиття	0,8	0,6	0,4

Таблиця 5.3 – Допустимі інтенсивності опромінення енергією УВЧ і НВЧ

Параметр	Час опромінення		
	15-20 хв.	2 год.	більше 2 год.
Інтенсивність опромінення, мкВт/см	1000	100	10

Таблиця 5.4 – Нормування електромагнітного випромінювання

Нормування	Частота, МГц			
	від 0,06 до 3	від 3 до 30	від 30 до 50	від 50 до 300
Значення електричної складової, В/м	50	20	10	5
Нормування	від 0,06 до 1,5		від 30 до 50	
Значення магнітної складової, А/м	5		0,3	

Таблиця 5.5 – Рівні освітленості для різних видів робіт

Характеристика зорової роботи	Розряд робіт	Підрозряд робіт	Освітленість	
			при комбінованому освітленні	при загальному освітленні
Дуже високої точності	II	а	4000	1250
		б	3000	750
		в	2000	500
		г	1000	300
Високої точності	III	а	2000	500
		б	1000	300
		в	750	300
		г	400	200
Середньої точності	IV	а	750	300
		б	500	200
		в	400	200
		г	300	150

Таблиця 5.6 – Мінімальний об'єм зовнішнього повітря в приміщенні на одного працюючого

Параметр	Об'єм приміщення, м ³			
	20	20-40	40	для приміщення без вікон
Об'єм зовнішнього повітря, м ³	30	20	природна вентиляція	60

4.3 Розрахунок вентиляції

Системи опалення та кондиціонування слід встановлювати так, щоб ні тепле, ні холодне повітря не прямувало на людей, рекомендується

створювати динамічний клімат з певними перепадами показників. Температура повітря біля поверхні підлоги і на рівні голови не повинна відрізнятися більш ніж на 5 градусів. Основним параметром, визначальним показники вентиляційної системи, є кратність обміну, тобто скільки разів на годину зміниться повітря у приміщенні.

Проведемо розрахунок для приміщення моделювання розмірами:

Для розрахунку приймемо такі розміри робочого приміщення: довжина $A = 9$ м, ширина $B = 4$ м та висота $H = 3,5$ м. Виконаємо розрахунок:

- $V_{нов}$ – об'єм повітря, необхідний для обміну;
- $V_{пр}$ – об'єм робочого приміщення.

Відповідно обсяг вентиляції приміщення дорівнює:

$$V_{пр} = A \cdot B \cdot H = 126 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Необхідний для обміну об'єм повітря $V_{вент}$ визначимо, виходячи з рівняння теплового балансу

$$V_{вент} \cdot C(t_{вих} - t_{зах}) \cdot Y = 3600 \cdot Q_{надм},$$

де: $Q_{надм}$ – надмірна теплота, Вт;

$C = 1000$ – питома теплопровідність повітря, Дж/кг К;

$Y = 1,2$ – щільність повітря, мг/см³;

$t_{вих}$, $t_{зах}$ – температури повітря, що виходить та приходить до приміщення.

Температура повітря, що виходє з приміщення, визначається за формулою

$$t_{вих} = t_{р.м.} + (H-2) t,$$

де: $t = 1-5$ градусів – перевищення t на 1 м висоти приміщення;

$t_{р.м.}$ – температура на робочому місці, (норма ~ 22 °С);

$H = 3,5$ м – висота приміщення;

$$t_{виход} = 22 + (3,5-2) \cdot 3 = 26,5 \text{ (}^{\circ}\text{C)}.$$

Надмірна теплота є складною величиною

$$Q_{надм.} = Q_{надм1} + Q_{надм2} + Q_{надм3}.$$

$Q_{надм1}$ – надмірна теплота від електрообладнання та освітлення

$$Q_{надм1} = E \cdot P,$$

де: E – коефіцієнт втрат електроенергії на тепловідведення (для освітлення $E = 0,55$);

P – потужність (з розрахунку $40 \text{ Вт} \cdot 6 = 240 \text{ Вт}$).

$$Q_{надм1} = 0,55 \cdot 240 = 132 \text{ (Вт)}.$$

$Q_{надм2}$ – теплонадходження від сонячної радіації

$$Q_{надм2} = t \cdot S \cdot k \cdot Q_c,$$

де: t – кількість вікон (для нашого приміщення $t = 2$);

S – площа вікна (з розрахунку $2,5 \text{ м} \cdot 2,2 \text{ м} = 5,5 \text{ м}$);

k – коефіцієнт, що враховує скління (для подвійного скління $k = 0,6$);

Q_c – теплонадходження від вікон ($Q_c = 127 \text{ Вт/м}$).

$$Q_{надм2} = 5,5 \cdot 2 \cdot 0,6 \cdot 127 = 838,2 \text{ (Вт)}.$$

$Q_{надм3}$ – тепловиділення людей

$$Q_{надм3} = n \cdot q,$$

де: $q = 80 \text{ Вт/люд.}$;

n – кількість працюючих людей в приміщенні (у нашому випадку $n = 6$).

$$Q_{надм3} = 6 \cdot 80 = 480 \text{ (Вт)}.$$

Підставивши розраховані складові в загальну формулу, маємо

$$Q_{надм} = 132 + 838,2 + 480 = 1450,2 \text{ (Вт)}.$$

Тоді, з рівняння теплового балансу випливає:

$$V_{вент} = \frac{3600 \cdot 1450,2}{100 \cdot (26,5 - 19)} = 696,1 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Оптимальним варіантом є кондиціонування повітря, тобто автоматична підтримка його стану у приміщенні відповідно до певних вимог (задана температура, вологість, рухливість повітря) незалежно від зміни стану зовнішнього повітря та умов у самому приміщенні.

За результатами розрахунку оберемо кондиціонери типу БК тому, що приміщення має забезпечуватися не менше, ніж двома кондиціонерами, а

найпотужніший кондиціонер серії КТА забезпечує надлишковий потік повітря для нашого випадку.

4.4 Електробезпека

За категорією небезпеки приміщення обчислювального центру належить до приміщень без підвищеної небезпеки. Конструкція ПК забезпечує електробезпеку для людини, що працює на ньому. Тим не менш, ПК є електричним пристроєм, що працює від мережі змінного струму напругою 220В.

Щоб запобігти ураженню електричним струмом, виникнення пожежі та виходу з ладу самого ПК при роботі та його технічному обслуговуванні необхідно дотримуватися таких запобіжних заходів:

- розетки, від яких живиться ПК, мають відповідати його вилкам кабелів електроживлення;
- забороняється використовувати як заземлення водопровідні та газові труби, радіатори та інші вузли опалення;
- забороняється під час роботи ПК відключати та підключати з'єднувальні кабелі;
- забороняється знімати кришку системного блоку та проводити будь-які операції всередині корпусу до повного відключення ПК від електроживлення;
- забороняється розбирати монітор та намагатися самостійно усувати несправності (небезпечні для життя високі напруги на елементах схеми монітора зберігаються тривалий час після відключення електроживлення);
- забороняється закривати вентиляційні отвори на корпусі системного блоку та монітора сторонніми предметами, щоб уникнути перегрів елементів розташованих усередині цих пристроїв;

- повторне увімкнення ПК рекомендується проводити не раніше, ніж через 20 секунд після вимкнення.

4.5 Пожежна безпека

Приміщення обчислювального центру з пожежонебезпечності належить до категорії В. ПК є джерелом підвищеної пожежної небезпеки, оскільки за відхиленні реальних умов експлуатації від розрахункових, можуть виникнути пожежонебезпечні ситуації. Тому важливо дотримуватися таких вимог:

- фальшпідлога в приміщенні має бути виготовлена з негорючих матеріалів або мати вогнестійкість не менше 30 хв.;

- простір під ним слід розділяти негорючими діафрагмами на відсіки площею більше 250 м². Діафрагми повинні мати межу вогнестійкості не менше 0,75 год. У місцях перетину з діафрагмами комунікації слід прокладати у спеціальних обіймах, а зазори зашпарювати негорючими матеріалами;

- звукопоглинаюче облицювання стін та стель приміщення слід виготовляти з негорючих або важкогорючих матеріалів;

- для промивання деталей ПК рекомендується використовувати негорючі рідини;

- електроживлення ПК повинно мати автоматичне блокування відключення електроенергії у разі зупинки охолодження та кондиціонування;

- систему вентиляції слід обладнати блокувальним пристроєм, який забезпечує її відключення на випадок пожежі;

- агрегати, вузли та кабельні канали ПК мають очищатися від пилу персоналом щокварталу;

- після закінчення роботи, перед закриттям приміщення ПК необхідно відключити від електромережі;

- у приміщеннях з ПК, що не підлягають обладнанню автоматичними установками газового пожежогасіння, слід передбачати вбудовування системи автоматичної пожежної сигналізації, що реагує на появу диму, та забезпечувати ці приміщення пересувними або переносними вуглекислотними вогнегасниками з розрахунку не менше двох на кожні 20 м² приміщення.

Будівля обчислювального центру має бути забезпечена первинними засобами пожежогасіння: вогнегасниками, ящиками з піском, бочками з водою, покривалами з негорючого теплоізоляційного полотна, грубої шерстяної тканини, пожежними відрами, совковими лопатами, пожежним інструментом (гаками, ломами, сокирами тощо), що використовуються для локалізації та ліквідації пожеж у початковій стадії їх розвитку.

Пожежні щити (стенди) встановлюються біля підприємства з розрахунку один щит (стенд) на площу 5000 м². До комплекту засобів пожежогасіння, які розміщуються на ньому, слід включати: вогнегасники – 3 шт., ящик з піском – 1 шт., покривало з негорючого теплоізоляційного матеріалу, розміром 2 м x 2 м – 1 шт., гаки – 3 шт., лопати – 2 шт., ломы – 2 шт., сокири – 2 шт. Пожежні щити (стенди) та засоби пожежогасіння мають бути пофарбовані у відповідні кольори за чинним державним стандартом. На пожежних щитах (стендах) слід зазначати їх порядкові номери та номер телефону для виклику пожежної охорони.

Покривала мають мати розмір не менше 1 м x 1 м. Вони призначені для гасіння невеликих вогнищ пожеж у разі займання речовин, горіння яких не може відбуватися без доступу повітря. Покривала слід застосовувати для гасіння пожеж класів *A, B, B, E*.

Ящики для піску повинні мати об'єм 0,5; 1,0 або 3,0 м³ та бути укомплектованими совковою лопатою. Конструкція ящика має забезпечувати зручність видобутку піску та унеможливити потрапляння опадів.

Громадські будівлі та споруди повинні мати на кожному поверсі не менше двох переносних вогнегасників. У місцях зосередження апаратури та обладнання великої вартості кількість засобів пожежогасіння може бути збільшена. Коли від пожежі захищаються приміщення з ПК, слід враховувати специфіку вогнегасних речовин в вогнегасниках, які призводять під час гасіння до псування обладнання. Ці приміщення рекомендується оснащувати вуглекислотними вогнегасниками. З урахуванням допустимої концентрації вогнегасної речовини розташування вогнегасників не має перевищувати 20м.

Переносні вогнегасники повинні розміщуватись шляхом:

- навішування на вертикальні конструкції на висоті не більше 1,5 м від рівня підлоги до нижнього торця вогнегасника та на відстані від дверей, достатньому для її повного відчинення;

- встановлення у пожежні шафи поруч з ПК у спеціальні тумби чи ніші.

План евакуації з приміщення під час пожежі представлено на рис. 4.1.

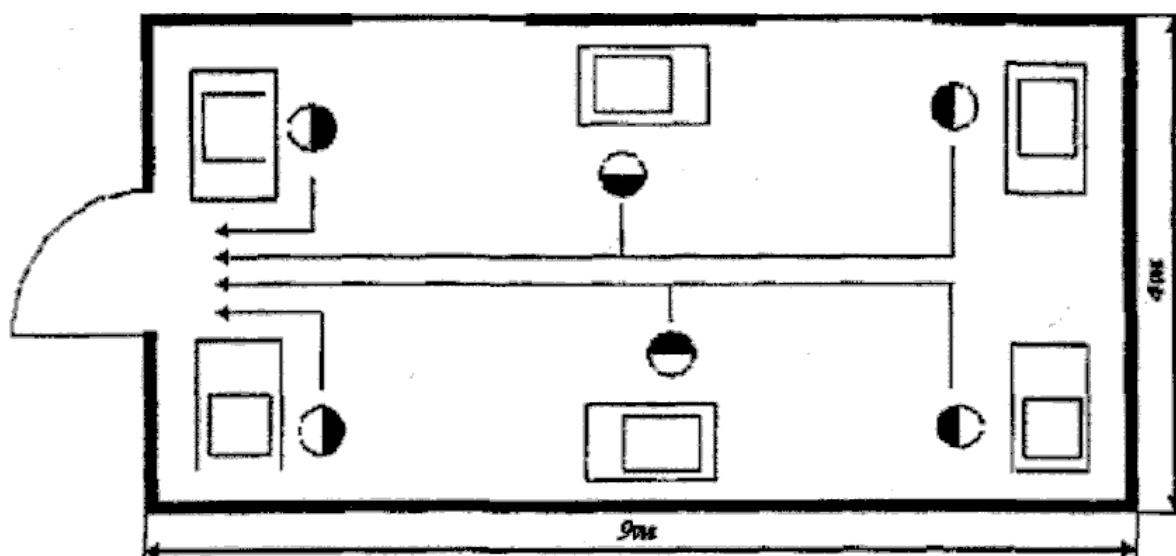


Рис. 4.1 – План евакуації з приміщення під час пожежі

Такий план евакуації має бути розміщено на видному місці в приміщенні біля дверей.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі був проведений аналіз сучасного стану волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ). Розглянуто компонентні складові оптичних волокон, основні до них вимоги та загальні моделі опису втрат світла в оптичному волокні.

Встановлено, що технологічні аспекти виконання з'єднань мережі, прокладення оптичного кабелю, наявність перегинів оптичного волокна значно впливають на кількісні показники втрат. Врахування таких факторів призводить до ускладнення математичного опису та викликають значні труднощі практичного розрахунку.

У роботі в результаті проведених теоретичних та розрахункових досліджень, які були спрямовані на вирішення зазначеної проблеми:

- розглянуто конструкції та параметри різних типів оптичних волокон, що застосовуються у сучасних ВОЛЗ;
- описано причини появи вигинів оптичних волокон (кабелю);
- проведено облік втрат світла, що виникають на ділянках згину оптичного волокна;
- запропоновано методику розрахунку залежностей коефіцієнта загасання вигнутої ділянки волокна від радіусу вигину та довжини хвилі;
- виконано практичні розрахунки згинальних втрат;
- проведено дослідження згинальних втрат в одномодових стандартних оптичних волокнах та в волокнах з ненульовою зміщеною дисперсією в розсіяному світлі.

Проведені експериментальні дослідження за темою кваліфікаційної роботи, щодо дослідження згинальних втрат. Доведено, що згинальні втрати швидко зменшуються зі зростанням висоти профілю оптичного волокна. Однак збільшення висоти профілю призводить до погіршення інших параметрів волокна, наприклад, зменшення діаметра модового поля.

Встановлено, що у вигнутому волокні втрати збільшуються із збільшенням довжини хвилі. Це обумовлено тим, що збільшується діаметр моди і дедалі більша частина потужності моди випромінюється в оболонку волокна у відповідності з законами оптики.

Проведено аналіз умов праці на робочому місці проектувальника РЕА, розглянуті основні небезпечні фактори в обчислювальному центрі та надані рекомендації щодо виробничої безпеки і санітарії праці.

Докладно розглянуті вимоги до приміщення, у якому виконуються роботи на ПК, та питання безпеки при виконанні робіт з моделювання. Проведено розрахунок кондиціонування та опрацьовані питання електробезпеки і пожежної безпеки приміщення.

Кваліфікаційна робота виконана в інтересах кафедри ПЕЕА ХНУРЕ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3008: 2015. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. – Введ. 23.02.95. – К.: ІпрІн, УкрІНТЕІ, ГВСЕЦНАНУ. – 39 с.
2. Былина М.С., Глаголев С.Ф., Кочановский Л.Н., Пискунов В.В. Измерение параметров волоконно-оптических линейных трактов: Учеб. пособие./ СПб ГУТ. – СПб, 2002. – 360 с.
3. Снайдер А., Лав Д. Теория оптических волноводов. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
4. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. – М.: Мир, 1984. – 788 с.
5. Ландсберг Г.С. Оптика: Учеб. пособие для ВУЗов. – 6-е изд. – М.: Физматлит, 2003. – 504 с.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Издание 2-е.// Перевод с англ. Глав. ред. физ.-мат. лит-ры изд-ва «Наука», 1973. – 280 с.
7. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРарт, 2005. – 196 с.
8. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Изд. Syrus.Systems, 1999. – 270 с.
9. Носов Ю.Р. и др. Математические модели элементов интегральной электроники. – М.: Сов. радио, 1976. – 304 с.
10. Гроднев И.И., Мурадян А.Г., Шарафутдинов Р.М. и др. Волоконно-оптические системы передачи и кабели: Справочник. – М.: Радио и связь, 1993. – 302 с.
11. Гладышевский М.А. и др. Оптическое волокно для систем передачи информации. – Волоконная оптика, М.: ВиКо, 2002. – 168 с.
12. Охрана труда в радио- и электронной промышленности./ Под ред. С.П. Павлова. – М.: Радио и связь, 2005. – 200 с.

ДОДАТОК А
Презентація

